

Deborah Santos de Assis Liguori

**CRISTAIS LÍQUIDOS COMO FERRAMENTA DE ENSINO EM
FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Graduação
em Física da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção
do Grau de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Helmuth
Bechtold

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Liguori, Deborah Santos de Assis
Cristais Líquidos como Ferramenta de Ensino em Física
Moderna e Contemporânea / Deborah Santos de Assis Liguori ;
orientador, Ivan Helmuth Bechtold - Florianópolis, SC,
2016.
73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas. Graduação em Física.

Inclui referências

1. Física. 2. Ensino de Física. 3. Física Moderna e
Contemporânea. 4. Cristais Líquidos. 5. Displays. I. Helmuth
Bechtold, Ivan . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Física. III. Título.

Deborah Santos de Assis Liguori

CRISTAIS LÍQUIDOS COMO FERRAMENTA DE ENSINO EM FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Licenciado em Física e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Física,

Florianópolis, 12 de dezembro de 2016.

Prof. Celso Yuji Matuo, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Ivan Helmuth Bechtold, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a. Juliana Eccher, Dr.^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a. Tatiana da Silva, Dr.^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais,
Alfonso e Vanda, e aos meus irmãos,
Alessandro, Stefano e Giancarlo. Com
todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família por todo o apoio e carinho. Ao meu pai, Alfonso, por sempre ter me influenciado positivamente. *Grazie infinite, papà. Grazie per essere stato accanto a me e per aver sempre avuto fiducia nelle mie scelte.* À minha mãe, Vanda, por ter se sacrificado para sempre me dar educação de qualidade e por ser um exemplo para mim. À minha segunda mãe, Sylvania, por sempre ter acreditado em mim e pelo apoio durante toda a graduação. Aos meus irmãos, Alessandro, Stefano e Giancarlo, por sempre estarem ao meu lado. Vocês são grande parte de mim.

Agradeço ao meu orientador, Professor Ivan, por ter me guiado na realização desse trabalho e durante meus três anos de iniciação científica. Obrigada pela oportunidade, pelos conselhos e críticas, pela paciência e dedicação.

Aos membros da banca examinadora que se disponibilizaram a avaliar este trabalho e que fazem parte direta na minha formação. À Professora Juliana, que também me acompanhou na iniciação científica, compartilhando de suas ideias e seu tempo. À Professora Tatiana, cuja aulas motivaram a escolha do tema deste trabalho. Vocês são uma inspiração para mim!

Agradeço também aos demais professores que contribuíram para minha formação acadêmica, desde a educação infantil à graduação. Em especial, aos professores Aimã e Chico, por despertarem em mim a paixão pela Física. *Vorrei ringraziare anche le mie professoresse delle medie, la Bonardi, la Canonico, la Giuggia e la Peyron, per avermi fatto capire l'importanza dello studio e il piacere di insegnare.*

A todos os meus queridos amigos e companheiros dessa jornada, em especial ao Ismael, Carlos, Oliver, Rodolfo e Larissa por terem sido minha família em Florianópolis. Agradeço também aos amigos que, infelizmente, não puderam estar por perto, mas estavam sempre torcendo por mim. *Grazie Erika, per aver fatto il tifo per me.*

Ao Antonio Marcos, que me acolheu e guiou desde o início da graduação.

Agradeço profundamente ao Guilherme pelo apoio, incentivo e suporte incondicional que tornaram este trabalho possível e prazeroso. Obrigada por todo amor e carinho e, principalmente, obrigada por acreditar em mim e por me estimular a seguir em frente.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho e que porventura não foram aqui citados.

Wyrd bið ful aræd.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de uma proposta para a inclusão de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Propostas deste tipo têm sido discutidas desde a década de 1960, quando constatou-se a necessidade de atualizar os currículos escolares de modo que acompanhassem os grandes avanços científicos e tecnológicos e o progresso da própria Física. No intuito de promover essa inserção de maneira contextualizada e levando em conta as diversas dificuldades enfrentadas pelas escolas brasileiras e pelos professores de Física, foi desenvolvida uma sequência de atividades voltada para o segundo e o terceiro ano do Ensino Médio, explorando os tópicos de polarização, birrefringência, transições de fase e interação de um dipolo elétrico com campo elétrico uniforme dentro de uma visão aplicada aos displays de cristal líquido. O tema foi escolhido por ser moderno e de interesse dos alunos, uma vez que o seu entendimento pode explicar o funcionamento de mostradores, como telas de televisão, tablets, celulares, etc... baseados em cristais líquidos. Além disso, é um tema que possibilita um enfoque interdisciplinar, por envolver também aspectos de química e de engenharia. A sequência conta com atividades investigativas, atividades experimentais, exibições de vídeos e resoluções de exercícios.

Palavras-chave: Ensino de Física. Física moderna e contemporânea. Cristais líquidos. Displays.

ABSTRACT

This work aimed the elaboration of a proposal for the inclusion of topics of Modern and Contemporary Physics in Secondary School. Such proposals of this have been discussed since the 1960s, when it became necessary to update the schools curricula to follow the major scientific and technological advances and the progress of Physics itself. In order to promote this insertion in a contextualized way and taking into account the various difficulties faced by the Brazilian schools and Physics teachers, a teaching sequence was developed for the 11th and 12th grades exploring the subjects of polarization, birefringence, phase transitions and the interaction of an electric dipole with a uniform electric field, within the context of liquid crystal displays. This topic was chosen because it is modern and of interest for the students, since its understanding explains the operation of displays based on liquid crystal, such as LCD TVs, cell phones, etc. In addition, this subject allows an interdisciplinary approach, involving aspects of Chemistry and Engineering. The teaching sequence includes investigative activities, experimental activities, video exhibitions and exercise solving.

Keywords: Physics Teaching. Modern and Contemporary Physics. Liquid Crystals. Displays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da relação entre os tópicos de Física Clássica e FMC que serão abordados na sequência de atividades.

Figura 2: Representação esquemática de ligações interatômicas (bastonetes) e intermoleculares (a) de hidrogênio e (b) de dipolo permanente - dipolo permanente (linha tracejada).

Figura 3: Representação genérica do potencial de Lennard-Jones em função da distância, ilustrando separadamente suas componentes atrativa e repulsiva.

Figura 4: Efeito da agitação térmica sobre o equilíbrio de moléculas ligadas pelo potencial de Lennard-Jones. (a) Diferentes temperaturas num mesmo poço de potencial. (b) Mesma temperatura em poços de potencial de profundidades distintas.

Figura 5: Representação estrutural das mesofases em cristais líquidos, ilustrando o efeito da temperatura sobre as transições de fase.

Figura 6: Representação estrutural de moléculas típicas de CLTs (a) discóticos e (b) calamíticos com suas representações esquemáticas (disco e cilindro).

Figura 7: Representação estrutural de uma molécula anfifílica com cabeça polar (rosa) e cauda carbônica apolar (roxo).

Figura 8: Representação esquemática de (a) micelas e (b) micelas reversas.

Figura 9: Representação esquemática da mesofase nemática (a) calamítica e (b) discótica.

Figura 10: Representação esquemática da (a) mesofase esméctica A e da (b) mesofase esméctica C, na qual as moléculas apresentam um ângulo de inclinação α em relação à normal ao plano das camadas.

Figura 11: Representação do empacotamento molecular dos CLTs discóticos nas fases colunares (a) ordenada, (b) desordenada e (c) colunar hexagonal com vista superior.

Figura 12: Representação esquemática da mesofase colestérica.

Figura 13: Representação do eixo de propagação de um raio luminoso e de seus planos de vibração elétrica e magnética. Fonte: alunosonline.uol.com.br/quimica/luz-polarizada-nao-polarizada.html

Figura 14: Representação esquemática da polarização da luz na (a) vertical e na (b) horizontal, onde as setas azuis representam a direção de oscilação do campo elétrico.

Figura 15: Representação esquemática da polarização da luz com polarizadores (a) paralelos e (b) perpendiculares.

Figura 16: Imagens de flores vistas através de polarizadores (a) paralelos, (b) cruzados de aproximadamente 45° e (c) cruzados de 90° .

Figura 17: Representação de uma amostra de CL confinada entre duas lâminas de vidro (delimitada pelo retângulo vermelho) entre polarizadores (a) paralelos, (b) com ângulo de 45° entre si e (c) cruzados de 90° .

Figura 18: Imagem de flores vistas através de um pedaço de fita adesiva quadrado (durex) entre polarizadores cruzados.

Figura 19: Imagens capturadas por um microscópio óptico de luz polarizada com amostras de cristal líquido entre polarizadores cruzados. (a) mesofase esméctica A e (b) mesofase colunar hexagonal.

Figura 20: Modelo de dipolo elétrico formado por uma carga positiva e uma negativa, definindo um momento de dipolo elétrico \vec{p} .

Figura 21: Representação do efeito das ranhuras na organização das moléculas de um CL calamítico.

Figura 22: Representação esquemática da torção causada nas moléculas devido às ranhuras microscópicas no substrato.

Figura 23: Representação esquemática do alinhamento das moléculas promovido pela diferença de potencial aplicada.

Figura 24: Display de calculadora, onde é possível ver *pixels* ativos e não ativos.

Figura 25: Interface da simulação sobre interações intermoleculares do site PhET Colorado.

Figura 26: Representações de uma onda transversal em uma corda vibrando verticalmente, passando por uma fenda (a) vertical e (b) horizontal.

Figura 27: Representação de uma onda longitudinal passando por uma fenda (a) vertical e (b) horizontal.

Figura 28: Representação esquemática da montagem da celinha.

Figura 29: Representação esquemática da ordem dos materiais ao final da montagem do dispositivo.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EM – Ensino Médio

FMC – Física Moderna e Contemporânea

PCNEM – Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio

SA – Sequência de Atividades

CL – Cristal Líquido

PCSCa – Proposta Curricular de Santa Catarina (1998)

PCNEM+ – Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais

PNLDEM – Programa Nacional do Livro Didático do Ensino Médio

BNCC – Base Nacional Comum Curricular

CLT – Cristal Líquido Termotrópico

CLL – Cristal Líquido Liotrópico

CMC – Concentração Micelar Crítica

LCD – Display de Cristal Líquido (do inglês, *Liquid Crystal Display*)

LED – Diodo Emissor de Luz (do inglês, *Light Emitting Diode*)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	23
1.1 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA	23
1.1.1 <i>A importância da Física moderna e contemporânea no Ensino Médio</i>	23
1.1.2 <i>Situação atual e dificuldades encontradas no Ensino Médio</i>	26
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	31
2.1 INTERAÇÕES INTERMOLECULARES NA MATÉRIA CONDENSADA	32
2.2 CRISTAIS LÍQUIDOS.....	35
2.2.1 <i>Cristais Líquidos Termotrópicos</i>	37
2.2.2 <i>Cristais Líquidos Liotrópicos</i>	38
2.2.3 <i>Classificação De Mesofases</i>	40
2.2.3.1 Mesofase nemática.....	40
2.2.3.2 Mesofase esméctica	41
2.2.3.3 Mesofase colunar	41
2.2.3.3 Mesofase colestérica	42
2.3.1 <i>Polarização</i>	43
2.3.2 <i>Birrefringência</i>	45
2.4 INFLUÊNCIAS EXTERNAS SOBRE CRISTAIS LÍQUIDOS.....	47
2.5 FUNCIONAMENTO DE UM DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO.....	49
3. APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA	53
3.1 SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES	53
3.1.1 <i>Objetivos</i>	53
3.2 MÓDULOS	54
3.2.1 <i>Módulo 1: pré-teste</i>	54
3.2.2 <i>Módulo 2: desafios</i>	55
3.2.3 <i>Módulo 3: construção de um display de cristal líquido</i>	61
3.2.4 <i>Módulo 4: vídeos</i>	64
3.2.5 <i>Módulo 5: relatório</i>	65
3.2.6 <i>Módulo 6: teste pós-atividades</i>	68
CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
REFERÊNCIAS	71

INTRODUÇÃO

Os crescentes avanços científicos e tecnológicos das últimas décadas contrastam com um ensino de Física que vem sendo realizado de maneira desatualizada e descontextualizada. Segundo Terrazzan (1992, p. 210) “a grande concentração de tópicos se dá na Física desenvolvida aproximadamente entre 1600 e 1850” e, devido à grande quantidade de conteúdo e à pequena carga horária, dificilmente é possível cumprir toda a programação, limitando a Física do Ensino Médio (EM) “à Cinemática, Leis de Newton, Termologia, Óptica Geométrica, Eletricidade e Circuitos Simples”.

A inclusão de tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) no currículo do EM tem sido uma das estratégias para promover a atualização e a contextualização do ensino de Física. Essa proposta tem sido corroborada por diversas pesquisas, como as de Laburú, Simão e Urbano (1998), Ostermann e Moreira (2000) e Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007), além de contar com suporte de documentos oficiais. Os Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM), por exemplo, defendem um ensino de Física que “contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais” (BRASIL, 2000, p. 22).

“O aprendizado de Física deve estimular os jovens a acompanhar as notícias científicas, orientando-os para a identificação sobre o assunto que está sendo tratado e promovendo meios para a interpretação de seus significados” (BRASIL, 2000, p. 27).

No intuito de promover o ensino de Física de maneira contextualizada, propomos uma Sequência de Atividades (SA) que irá abordar tópicos de Física Clássica, como: polarização, birrefringência, transições de fase e interação de um dipolo elétrico com um campo elétrico uniforme, com uma visão aplicada aos tópicos de FMC: Cristais Líquidos (CLs) e mostradores de informações.

O trabalho está dividido em três capítulos: o primeiro apresenta um levantamento bibliográfico, mostrando as vantagens e as problemáticas em ensinar FMC no EM; o segundo fornece fundamentos teóricos sobre os tópicos que serão abordados e no último capítulo é apresentada a sequência de atividades, que está dividida em seis módulos.

No primeiro módulo, um pré-teste é aplicado utilizando-se um questionário para que o professor consiga identificar as concepções

prévias dos alunos, permitindo organizar com mais eficiência a ordem de aplicação das atividades. Nos desafios, tema do segundo módulo, os alunos são colocados diante de diferentes situações-problema e são incentivados a formular hipóteses. É nesta etapa que serão introduzidos os tópicos a serem trabalhados. O terceiro módulo, construção de um display de cristal líquido, prevê uma atividade experimental, na qual os alunos poderão colocar em prática os conceitos aprendidos no módulo anterior. No quarto módulo, vídeos, são exibidos vídeos explicativos para auxiliar a atividade anterior. O relatório, proposto no quinto módulo, é uma atividade escrita onde são indicadas questões teóricas e experimentais a respeito do terceiro módulo. Por fim, no sexto e último módulo, teste pós-atividades, sugerimos a reaplicação do questionário proposto no primeiro módulo, de modo a avaliar a evolução nas respostas dadas pelos alunos.

Vale ressaltar que muitas dessas atividades, senão todas, possuem um princípio de interdisciplinaridade que é um dos três importantes princípios norteadores introduzidos pelos PCNEM, junto ao princípio da contextualização e ao princípio do ensino fundado em conteúdos e competências de maneira unificada.

1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

1.1 FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA

Os conhecimentos físicos desenvolvidos até o final do século XIX, denominados por Física Clássica, não forneciam explicação adequada para fenômenos como a invariância da velocidade da luz, a estabilidade do átomo, entre outros. Com o advento da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein e dos Quanta de Planck, estabeleceu-se a Física Moderna, que perdura até a década de 1940. Os estudos realizados após o início da Segunda Guerra Mundial até os dias atuais são englobados na chamada Física Contemporânea. Portanto, consideramos por FMC toda Física desenvolvida a partir do final do século XIX (PERFOLL, 2006).

Em nosso dia a dia estamos rodeados pelos progressos obtidos através do desenvolvimento da FMC, no entanto, nem sempre nos damos conta disso. O funcionamento dos dispositivos que automaticamente acendem as luzes de postes de iluminação pública ao anoitecer, por exemplo, envolve conceitos de Física Quântica, como efeito fotoelétrico. Estamos tão acostumados a lidar apenas com o macroscópico, com o produto final, que raramente nos preocupamos em entender o funcionamento dos elementos microscópicos envolvidos ou os princípios físicos que possibilitam seu desenvolvimento.

Diante do grande avanço científico e tecnológico e do progresso da própria Física, por volta de 1960, os pesquisadores da área de ensino começaram a constatar a desatualização dos currículos escolares, surgindo assim as primeiras propostas de inserção da FMC no EM (TERRAZZAN, 1994).

1.1.1 A importância da Física moderna e contemporânea no Ensino Médio

Na maioria das escolas brasileiras de EM, como apontam os PCNEM, o ensino de Física vem sendo realizado de maneira descontextualizada, dando ênfase na utilização direta de fórmulas e na memorização estimulada pela insistente resolução de exercícios repetitivos. Esse quadro é agravado pela grande quantidade de conteúdos em conjunto com a pequena carga horária, o que acaba impossibilitando o aprofundamento necessário e a instauração de um diálogo construtivo entre aluno e professor.

Os PCNEM ressaltam que “o conhecimento da Física “em si mesmo” não basta como objetivo, mas deve ser entendido sobretudo como um meio, um instrumento para a compreensão do mundo” (BRASIL, 2000, p. 23). Para que isso ocorra, é preciso considerar a realidade dos alunos, levando para sala de aula tópicos modernos e contextualizados, que despertem a curiosidade dos jovens e possibilitem uma formação mais adequada para a cidadania.

Visando orientar as práticas docentes e a escolha dos saberes a ensinar, a Proposta Curricular de Santa Catarina (PCSCa), publicada em 1998, apresenta temas estruturadores. Também são sugeridas algumas ordens sequenciais e, em alguns casos, o tempo a ser dedicado. Para a disciplina de Física, por exemplo, no que diz respeito à Óptica, são sugeridos temas como fotografias, telas de TV e videogravadoras. Para a Mecânica, sugere-se iniciar pela Dinâmica, dirigindo-se às situações do cotidiano e dando ênfase às Leis de Conservação da Energia e da Quantidade de Movimento.

Existe, portanto, a necessidade de selecionar os conteúdos que serão trabalhados, bem como a ordem em que serão apresentados. Apesar de não disponibilizar uma lista de conteúdos a ser seguida rigorosamente, a PCSCa adverte que é importante seguir, na medida do possível, a sequência majoritariamente adotada em quase todo o Brasil, ou seja, Mecânica no primeiro ano do EM, Termodinâmica e Óptica no segundo e Eletromagnetismo no terceiro, evitando prejudicar alunos que eventualmente necessitem realizar uma migração escolar. Além disso, é importante ressaltar que o ensino “tradicional” não será superado com uma mera alteração nas ordens dos conteúdos, ou até mesmo com a adição de tópicos de FMC; é preciso que haja, também, mudança na prática docente.

A respeito da Física a ser ensinada no EM, Terrazzan (1992) afirma que

Neste nível de escolaridade devemos estar formando um cidadão, pronto para sua participação na sociedade. Sua formação deve ser global, pois sua capacidade de intervenção na realidade em que está imerso tem relação direta com sua capacidade de compreensão desta mesma realidade (TERRAZZAN, 1992, p. 213).

Para a maioria dos alunos, a Física do EM será o único contato com a Ciência Física durante a escolarização formal. Por este motivo, é

importante garantir um ensino que possibilite uma formação adequada para compreensão e participação do mundo em que vivem. Nota-se, portanto, uma necessidade indiscutível de tratar os conhecimentos e teorias modernas e contemporâneas.

As Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNEM+) evidenciam a importância da FMC para a compreensão das tecnologias atuais e destacam os CLs como parte desse processo.

Alguns aspectos da chamada Física Moderna serão indispensáveis para permitir aos jovens adquirir uma compreensão mais abrangente sobre como se constitui a matéria, de forma que tenham contato com diferentes e novos materiais, cristais líquidos e lasers presentes nos utensílios tecnológicos, ou com o desenvolvimento da eletrônica, dos circuitos integrados e dos microprocessadores (BRASIL, 2002, p. 70).

Ostermann e Moreira (2000), ao realizarem uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa da FMC no EM, apontam algumas justificativas para a inserção de tópicos contemporâneos no currículo escolar, sendo elas:

- Despertar a curiosidade dos estudantes e ajudá-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano;
- Garantir o contato com a pesquisa atual em Física;
- Atrair jovens para a carreira científica;
- Aumentar o entusiasmo dos professores ao lecionar tópicos novos.

Além disso, por tratar de tópicos modernos da Física, como, por exemplo, *buracos negros, teoria de cordas e teoria da relatividade*, com os quais os alunos, talvez, possam ter tido contato por meio de documentários, filmes, seriados, internet ou outros meios de comunicação, a FMC irá tornar a Física da sala de aula mais palpável, evitando a clássica pergunta: *por que tenho que aprender isso?* Pois, como apontam Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007), existe dificuldade em compreender qual a necessidade de se estudar Física, devido à prática pedagógica desvinculada e descontextualizada da realidade do aluno. O esclarecimento de certos conceitos também impedirá que o aluno cometa

equívocos ou que seja enganado por termos físicos que muitas vezes são utilizados de forma ingênua, e até perigosa, por diversas áreas como, por exemplo, *A cura quântica* de Deepak Chopra (medicina) ou *O ser quântico* de Zohar Danah (auto-ajuda).

1.1.2 Situação atual e dificuldades encontradas no Ensino Médio

A necessidade de atualização curricular era uma demanda do ensino de Física da década de 1960. Atualmente, os documentos oficiais, como os já citados PCNEM, PCNEM+ e PCSCa, englobam os conteúdos de FMC, enfatizando sua importância. Em 2014, apesar de conter bases teórico-metodológicas pertinentes e atuais, o Governo de Santa Catarina publicou a atualização da PCSCa, justamente devido aos desafios contemporâneos que permeiam o campo educacional.

Houve também um aumento considerável nas pesquisas, consolidando a FMC como uma linha de pesquisa no ensino de Física (SILVA, 2013). Ao comparar os dados obtidos nas revisões bibliográficas realizadas por Ostermann e Moreira (2000) e Pereira e Ostermann (2009), nota-se o crescente interesse e preocupação dos professores e pesquisadores em relação a essa proposta. Existe uma grande concentração de publicações que apresentam tópicos de FMC em forma de divulgação, ou como bibliografia de consulta para professores do EM. Por outro lado, há escassez de trabalhos que relatam propostas que tratem as concepções alternativas dos estudantes no que diz respeito ao tema.

Outra proposta que demonstra esforços em promover essa inserção e melhoria na educação básica é o Programa Nacional do Livro Didático do Ensino Médio (PNLDEM), realizado no âmbito do Ministério da Educação. Além de disponibilizar livros didáticos aos alunos das redes públicas escolares, o PNLDEM garante que as obras disponibilizadas contenham tópicos de FMC (BRASIL, 2014), uma vez que um dos critérios eliminatórios é tratar

de forma adequada e pertinente, considerando os diversos estudos presentes na literatura atual da área, tópicos usualmente classificados como de Física Moderna e Contemporânea e que sejam considerados importantes ou mesmo imprescindíveis para o exercício da cidadania ativa, crítica e transformadora, bem como para a inserção ativa, crítica e transformadora no mundo do trabalho (BRASIL, 2014, p.17).

Apesar de o cenário se mostrar favorável, o ensino atual enfrenta algumas problemáticas, como, por exemplo, a não repercussão das recomendações dos documentos oficiais sobre a aplicação da FMC na prática em sala de aula. Isso se deve a vários fatores, desde à falta de preparo dos professores que, além de serem mal remunerados, não apresentam formação adequada, até a indisponibilidade de uma carga horária maior.

Diante da lamentável realidade das escolas brasileiras, muitos professores acreditam não ser necessário priorizar os conteúdos de FMC, já que sequer é possível trabalhar todos os conceitos básicos da Física Clássica de maneira adequada. Os autores Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007) realizaram uma pesquisa com dez professores do EM atuantes em escolas públicas e privadas da cidade do Rio de Janeiro. Como resultado da pesquisa, constatou-se que entre os dez professores, apenas três já trabalharam com alguns tópicos de FMC. Os demais apontaram problemas como o programa dos exames vestibulares e a carga horária reduzida de Física.

Outro obstáculo, geralmente citado pelos professores, é a complexidade matemática envolvida nos conceitos de FMC. Nesse quesito, é importante ressaltar que a fenomenologia desses tópicos possui muito mais valor que a simples matematização dos conceitos. Além disso, abordando a FMC de maneira adequada, as dificuldades de aprendizagem encontradas não seriam tão diferentes das usuais enfrentadas com a Física Clássica.

Apesar de possuírem tópicos de FMC em seu conteúdo programático, praticamente todas as obras aprovadas pelo PNLD 2015 dedicam aos temas apenas uma seção ao final do último volume, sendo apresentada de maneira desconexa com as demais seções. Essa situação acaba promovendo a dificuldade de diálogo entre os conteúdos, fazendo com que os temas de FMC sejam tratados apenas como uma seção especial ou uma leitura complementar. Também há um engessamento na escolha dos tópicos; de fato, das 14 obras selecionadas, apenas uma cita a *tecnologia das comunicações* e apenas duas citam a *cosmologia*. As demais obras apresentam a seção dedicada à FMC dividida em três tópicos: teoria da *Relatividade*, *Física Quântica* e *Física Nuclear*. Em outros dois casos, além desses tópicos, são também citados especificamente a *Radioatividade* e a *Física das Partículas Elementares*.

Segundo Perfoli (2006), não se trata apenas de adicionar conteúdos de FMC nos já inchados currículos escolares e livros didáticos, pois não irá privilegiar os objetivos enunciados de uma ciência escolar voltada à formação do cidadão contemporâneo.

1.2 MOTIVAÇÃO PARA A ELABORAÇÃO DE UMA SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES

No intuito de promover a inserção da FMC em sala de aula de maneira contextualizada e levando em conta as diversas dificuldades apresentadas anteriormente, foi elaborada uma SA onde a Física Clássica e a FMC estão fortemente interligadas. Escolheu-se trabalhar com CLs e displays por serem temas modernos e de interesse dos alunos, uma vez que esses materiais estão muito presentes em nosso cotidiano, como em telas de televisão, celulares, tablets, notebooks, etc. Além disso, é um tema que possibilita um enfoque interdisciplinar, por envolver também aspectos de química (responsável pela síntese desses materiais) e de engenharia (responsável pela construção dos dispositivos).

Nessa perspectiva, os tópicos de polarização, birrefringência, transições de fase e interação de um dipolo elétrico com campo elétrico uniforme são explorados através da aplicação de CLs e displays. Vale ressaltar que, apesar de serem tópicos de Física Clássica, esses nem sempre são abordados no EM e alguns sequer constam nos livros didáticos, pois, *a priori*, não há uma necessidade clara de aprofundamento nesses temas, como é o caso da birrefringência e da interação dipolo – campo elétrico. No entanto, quando inseridos num contexto específico, como será proposto aqui, a compreensão desses conteúdos permite ao aluno entender o funcionamento de um dispositivo tecnológico presente em seu dia a dia. O conhecimento físico, com seus conceitos, leis, grandezas e relações matemáticas, assim como aponta a Base Nacional Comum Curricular (BNCC), ganha mais significado quando são utilizados em problemáticas reais (BRASIL, 2016).

Para Zabala, é possível encadear e articular diferentes atividades como, por exemplo, leituras, debates, simulações computacionais, exercícios e experimentos, de modo a aprofundar um determinado tema (ZABALA, 1998). Silva *apud* Brousseau ressalta que, nessas atividades, é necessário que haja momentos nos quais o aluno se encontre sozinho diante de uma situação problema, sem a intervenção do professor, para que se relacione com o problema baseando-se em seus conhecimentos prévios (SILVA, 2008). Nesse contexto, foram desenvolvidas atividades investigativas (chamadas de desafios), onde os professores iniciam propondo um problema à classe, seguido de atividades experimentais, exibições de vídeos e resolução de exercícios devidamente correlacionados com as primeiras atividades.

Inicialmente, pretende-se identificar, por meio de um questionário, as concepções prévias dos estudantes, promovendo a

aprendizagem dos conceitos a partir dessas situações (desafios, atividades experimentais, exibição de vídeos, etc), as quais permitem interpretar, compreender e relacionar as grandezas físicas envolvidas. No capítulo 3, onde é apresentada a proposta da sequência de atividades, são fornecidos mais detalhes, por exemplo, como conduzir a turma durante as atividades e o que avaliar.

A relação entre os tópicos de Física Clássica e FMC selecionados foi sintetizada em um esquema representado na Figura 1, mostrando, também, a flexibilidade existente na estruturação da SA.

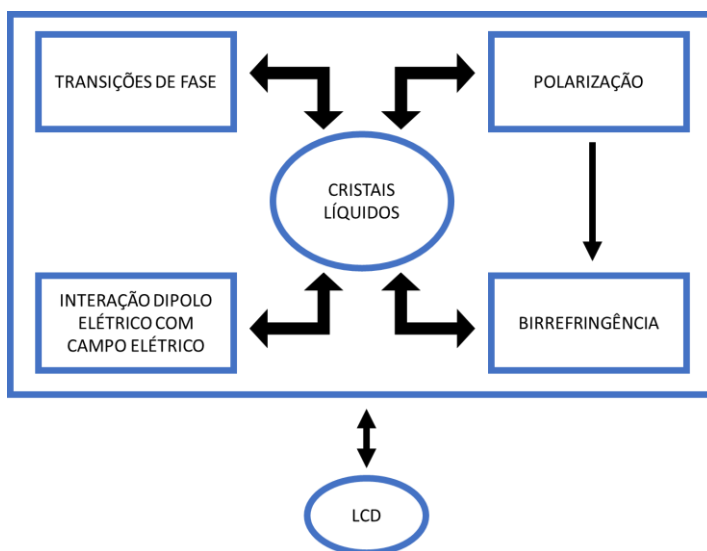


Figura 1: Esquema da relação entre os tópicos de Física Clássica e FMC que serão abordados na sequência de atividades.

No capítulo a seguir, esses tópicos são abordados cuidadosamente, visando servir de base teórica para os professores interessados em aplicar a proposta. O domínio desses conteúdos é necessário para propor adequadamente as situações problema e guiar os alunos na resolução, exigindo que façam uma conexão com seus conhecimentos prévios.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As propriedades físicas e químicas dos materiais dependem da disposição de seus átomos ou moléculas no espaço, que é governada pelas interações interatômicas e intermoleculares, ambas de natureza eletrostática. As forças interatômicas são responsáveis pelas ligações químicas entre átomos, enquanto as forças intermoleculares, que podem ser de diferentes tipos, são responsáveis pelas ligações entre moléculas (Figura 2), sendo a primeira mais intensa do que a segunda.

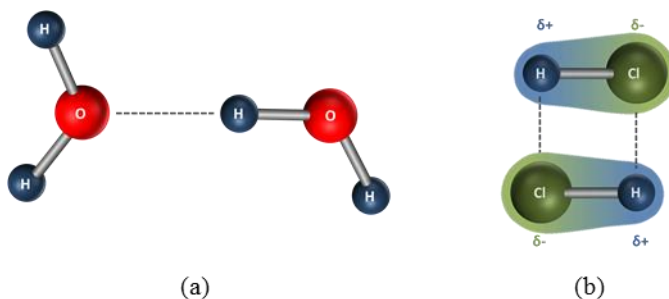


Figura 2: Representação esquemática de ligações interatômicas (bastonetes) e intermoleculares (a) de hidrogênio e (b) de dipolo permanente - dipolo permanente (linha tracejada).

As interações intermoleculares resultam na existência de diferentes tipos de organização das moléculas, refletindo macroscopicamente nos denominados estados físicos da matéria. Uma substância pode apresentar fases distintas, como, por exemplo, sólida, líquida e gasosa, nas quais há homogeneidade em relação às suas propriedades físicas e químicas.

Do ponto de vista macroscópico, os sólidos são caracterizados por possuírem forma e volume bem definidos, além de serem dificilmente deformados e comprimidos. Os líquidos também apresentam volume definido e baixa compressibilidade, mas são facilmente deformáveis, de forma que se adaptam ao recipiente em que se encontram. Já os gases, ocupam todo o volume disponível e possuem alta compressibilidade (FIESCHI, 1993). No entanto, a definição macroscópica dos estados da matéria é pouco rigorosa e não significativa, enquanto a descrição microscópica é mais precisa e fornece detalhes que a descrição macroscópica é incapaz de fornecer.

Num gás, a distância média entre as moléculas (ou átomos) é muito grande, de modo que elas interagem apenas quando colidem,

podendo ser consideradas isoladas. Num líquido ou num sólido, não é possível fazer essa consideração, já que a separação entre as moléculas é comparável ao tamanho molecular. Por via dessa proximidade, as moléculas interagem de maneira muito mais significativa, sob a ação de forças elétricas atrativas e/ou repulsivas (AMARAL, 2014). A matéria que se encontra no estado líquido ou sólido é dita matéria condensada e é esta a de interesse neste trabalho.

2.1 INTERAÇÕES INTERMOLECULARES NA MATÉRIA CONDENSADA

Foi o físico soviético Yakov Il'ich Frenkel, também conhecido como Jacob Frenkel, quem propôs, em 1946, a união de sólidos e líquidos como “corpos condensados”. Considerando-se esse novo conceito, a Física da Matéria Condensada se consolidou por volta de 1960, englobando o estudo dos líquidos e da Física do Estado Sólido. Atualmente, essa área é considerada o maior ramo da Física Moderna e Contemporânea, sendo responsável por um enorme avanço tecnológico que culminou em inovações nos campos da eletrônica, medicina, construção civil, entre outros (KOHN, 1999).

Do ponto de vista microscópico, a matéria condensada é caracterizada por apresentar moléculas próximas e organizadas pela ação de forças intermoleculares atrativas. Essas forças podem ser mais ou menos intensas, dependendo da polaridade das moléculas, e, de modo geral, são representadas pela formulação teórica de van der Waals. Caso a distância entre as moléculas se torne muito pequena, surgem forças repulsivas de caráter quântico como consequência do princípio da exclusão de Pauli. O matemático Sir John Edward Lennard-Jones, na década de 1920, propôs um modelo para a combinação dessas duas interações entre moléculas diatômicas.

A equação

$$V(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

é conhecida como potencial de Lennard-Jones, onde ε é a profundidade do potencial e σ é a distância (finita) para a qual o potencial interpartícula é igual a zero. O termo positivo representa as forças repulsivas e o termo negativo as atrações de van der Waals (LENNARD-JONES, 1924).

Na Figura 3, vemos que a combinação das componentes atrativa e repulsiva no potencial de Lennard-Jones dá origem a um mínimo

energético, que representa a distância de equilíbrio entre as moléculas. Nessa região, a intensidade das interações propicia a existência dos estados condensados, enquanto para distâncias grandes, com a energia potencial tendendo a zero, as moléculas não experimentam forças atrativas ou repulsivas, o que é típico dos gases.

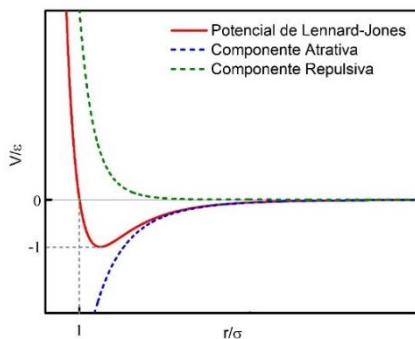


Figura 3: Representação genérica do potencial de Lennard-Jones em função da distância, ilustrando separadamente suas componentes atrativa e repulsiva.

É essencial analisar, também, o efeito da agitação térmica sobre a organização das moléculas para diferenciar, do ponto de vista energético, os estados físicos da matéria. Na Figura 4, é mostrado o efeito combinado da profundidade do poço de potencial, ϵ , e da energia térmica, $K_B T$ ($K_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta), sobre a mobilidade das moléculas.

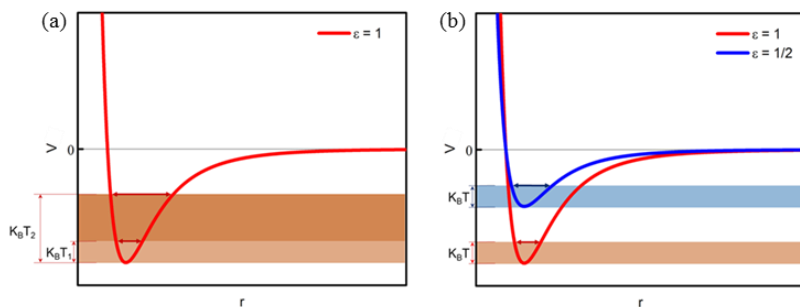


Figura 4: Efeito da agitação térmica sobre o equilíbrio de moléculas ligadas pelo potencial de Lennard-Jones. (a) Diferentes temperaturas num mesmo poço de potencial. (b) Mesma temperatura em poços de potencial de profundidades distintas.

No caso apresentado na Figura 4 (a), verifica-se que a liberdade de movimentação das moléculas, em torno do equilíbrio, cresce com o aumento da temperatura. Esses diferentes níveis de mobilidade irão afetar a organização e, consequentemente, o estado em que matéria se encontra. No estado sólido, as moléculas estão fortemente ligadas e possuem pouca mobilidade, enquanto no estado líquido a mobilidade é maior, mas não grande o suficiente para que as moléculas escapem do potencial, como acontece nos gases.

Podemos classificar os sólidos em cristalinos e amorfos. Os sólidos cristalinos apresentam seus átomos ou moléculas rigorosamente dispostos em torno de uma posição fixa e próximos uns dos outros, constituindo uma rede cristalina que se repete no espaço. Por outro lado, a organização espacial dos átomos nos sólidos amorfos não constitui uma rede geométrica fundamental, pois, ao se propagar no espaço, a nova rede apresenta pequenas diferenças em relação à anterior, quebrando a simetria. Assim, os cristais possuem ordem de longo alcance translacional e rotacional e os sólidos amorfos, como, por exemplo, os vidros e os plásticos, apresentam apenas ordem local.

De acordo com as ligações que mantêm organizados seus átomos, íons ou moléculas, os sólidos cristalinos são classificados em sólidos iônicos (formados pela atração entre cátions e ânions), sólidos covalentes, (nos quais os átomos interagem por meio de ligações covalentes), sólidos moleculares (cujo constituintes são moléculas) ou sólidos metálicos (consistem em cátions mantidos próximos por um mar de elétrons) (ATKINS, 2010).

Devido à simetria dos sólidos cristalinos, suas propriedades físicas, como as propriedades mecânicas e ópticas, a resistividade elétrica e a condutividade térmica, apresentam variações conforme a direção na qual são analisadas. A essa particularidade se dá o nome de anisotropia.

Nos líquidos, as moléculas estão distribuídas de forma aleatória no volume em que ocupam e, apesar de possuírem energia suficiente para que haja movimentação relativa entre elas, a energia cinética molecular não é suficiente para romper a ordem de curto alcance. A fluidez apresentada pelos líquidos se dá por essa movimentação intermolecular e é definida pela viscosidade, que depende, em parte, da intensidade das forças de ligação entre as moléculas. Quanto maior a viscosidade, menor a velocidade de escoamento (ATKINS, 2010). Diferentemente dos sólidos, os líquidos são caracterizados como isotrópicos, ou seja, suas propriedades permanecem constantes por translações e rotações no espaço.

Com o aumento gradual da temperatura de um sólido, aumenta, também, sua energia cinética molecular, gerando maior mobilidade das moléculas e permitindo a mudança do estado físico sólido para o líquido e, sucessivamente, para o gasoso. O estado físico no qual a matéria se encontra também pode ser alterado por meio de uma variação na pressão e vale ressaltar que, para cada substância, essa mudança de estado ocorre através de uma combinação de temperatura e pressão características.

A Figura 4 (b) explicita o efeito da temperatura para dois valores de ϵ , mostrando que as moléculas mais fortemente ligadas ($\epsilon=1$) possuem uma mobilidade menor do que as moléculas com ligações menos intensas ($\epsilon=1/2$). Assim, podemos inferir que a substância com poço de potencial mais profundo sofrerá o mesmo tipo de mudança de estado físico a uma temperatura mais elevada que a substância com poço de potencial menos profundo.

As mudanças de estado físico são casos particulares de transições de fase, que possuem um caráter mais geral. Uma transição de fase é caracterizada pela alteração (abrupta ou não) de determinadas propriedades de uma substância devido a variações em alguma condição externa. Se uma substância for submetida a alterações de temperatura, pressão, campo elétrico, campo magnético, entre outros, pode sofrer uma transição de fase sem, necessariamente, alterar seu estado físico.

A matéria condensada não se restringe, portanto, aos líquidos e sólidos, mas abrange estados intermediários, como a matéria mole, que refere-se a estados facilmente deformados por estresse térmico ou flutuações térmicas. Além dos cristais líquidos, que serão abordados a seguir, a matéria mole inclui colóides, polímeros, espumas, géis, materiais granulares, entre outros (AMARAL, 2014).

2.2 CRISTAIS LÍQUIDOS

O botânico austríaco Friedrich Reinitzer foi o primeiro a observar a fase líquido-cristalina quando, no decorrer de seus experimentos para tentar determinar a fórmula química do colesterol, constatou, para sua surpresa, uma peculiaridade durante a fusão de um dos compostos estudados. Aumentando gradualmente a temperatura de uma amostra sólida de benzoato de colesterila, além da fusão para um líquido turvo a 145,5 °C, Reinitzer observou uma segunda transição, a 178,5 °C, quando o líquido se tornava, repentinamente, transparente. Além disso, constatou um comportamento anormal e reversível na coloração da amostra durante seu resfriamento, que apresentava cor azul claro logo após o líquido transparente se tornar turvo e, em seguida, com a cristalização do líquido

turvo, apresentava cor azul-violeta brilhante. Reinitzer desconfiava que alguma isomeria física estivesse ocorrendo e, na expectativa de esclarecer a situação, buscou ajuda do renomado físico e cristalógrafo alemão Otto Lehmann, que analisou as amostras em seu microscópio óptico de luz polarizada.

O trabalho de Reinitzer foi apresentado em março de 1888 à Vienna Chemistry Society, dando início à ciência dos CLs, apesar de receberem esse nome apenas em 1889. Foi Lehmann, após observar um estado intermediário na fusão de algumas substâncias, no qual o líquido era birrefringente, quem os nomeou de CLs (em alemão, *fließender Kristall*), por acreditar que a única diferença em relação aos sólidos cristalinos era o grau de fluidez. Ele acreditava ter descoberto “cristais que fluem” (SLUCKIN *et al*, 2005).

Inicialmente, podemos afirmar que os CLs são substâncias que apresentam um estado da matéria intermediário entre sólidos cristalinos e líquidos isotrópicos, conhecido como mesomórfico (do grego, *Mesos Morphe*: entre dois estados). De fato, os CLs possuem propriedades que se apresentam entre as dos sólidos e as dos líquidos, como o grau de ordenamento molecular e a fluidez. No entanto, ao observar outras propriedades, como resposta a campos elétrico e magnético, vemos que nos CLs a resposta é muito mais intensa do que nos sólidos ou líquidos. O mesmo vale para a temperatura: os CLs são sensíveis a pequenas diferenças de temperatura que podem ser consideradas insignificantes para sólidos e líquidos. São essas propriedades únicas que tornam os CLs tão interessantes para diversas aplicações (BUSHBY *et al*, 2013).

Para que um material apresente propriedades líquido-cristalinas, ele deve, necessariamente, ser composto por moléculas (ou agregados de moléculas) orgânicas que tenham anisometria de forma, ou seja, que possuam uma das dimensões moleculares maior do que as demais. Essa característica garante que os CL apresentem, assim como os sólidos cristalinos, anisotropias em suas propriedades ópticas, elétricas e magnéticas (BECHTOLD, 2005). Apesar do ordenamento molecular apresentado pelos CLs ser capaz de induzir características do estado sólido, não é suficiente para evitar que apresentem fluidez, propriedade mecânica típica dos líquidos.

Por definição, os materiais que exibem mesomorfismo são denominados mesógenos e as diversas fases que podem exibir são nomeadas mesofases. Nos CLs, as mesofases são classificadas essencialmente pela simetria e grau de ordenamento apresentados, os quais podem ser influenciados por diversos parâmetros físicos. Nesse sentido, as transições de fase ocorrem pela quebra na ordem posicional

e/ou orientacional das moléculas, aumentando ou diminuindo seus graus de liberdade (BECHTOLD, 2005).

A Figura 5 ilustra o efeito da temperatura sobre a organização das moléculas nos CLs. Com o aumento da temperatura, a ordem posicional de longo alcance se perde, originando fases cada vez mais desordenadas até alcançar, finalmente, o líquido isotrópico.

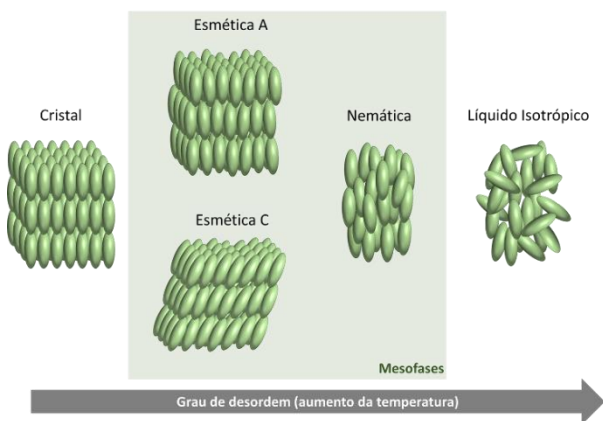


Figura 5: Representação estrutural das mesofases em cristais líquidos, ilustrando o efeito da temperatura sobre as transições de fase.

Os CLs podem ser divididos em Cristais Líquidos Termotrópicos (CLTs) e Cristais Líquidos Liotrópicos (CLLs). Essa divisão se dá de acordo com o parâmetro físico capaz de induzir as transições de fase: os CLTs apresentam, sobretudo, transições de fase termicamente induzidas, enquanto nos CLLs os parâmetros principais são a temperatura, pressão e concentração relativa dos compostos em um solvente.

2.1.2 Cristais Líquidos Termotrópicos

Nos CLTs em que o comportamento mesomórfico pode ser observado nos dois sentidos da transição de fase, partindo do estado sólido com o aumento da temperatura e durante o resfriamento a partir do líquido isotrópico, são ditos enantiotrópicos. Quando a mesofase é observada apenas durante o resfriamento, o CLT é dito monotrópico.

Os CLTs ainda apresentam dois subgrupos, classificados de acordo com a forma estrutural de suas moléculas: os CL discóticos possuem moléculas com formato achatado, geometricamente parecido a

um disco (Figura 6 a), e os CL calamíticos apresentam moléculas com formato alongado, semelhante a um bastão (Figura 6 b). Esses CLs são constituídos por moléculas orgânicas que possuem um núcleo rígido (centro aromático π -conjugado) circundado por cadeias alifáticas flexíveis.

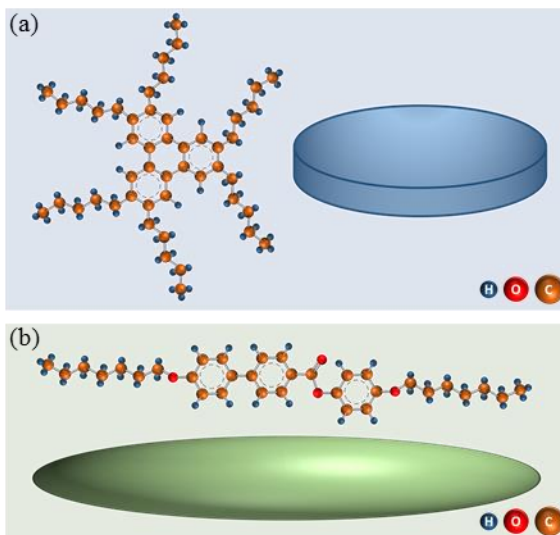


Figura 6: Representação estrutural de moléculas típicas de CLTs (a) discóticos e (b) calamíticos com suas representações esquemáticas (disco e cilindro).

O interesse no estudo de CLTs vai desde aspectos de pesquisa básica em Física e Química até aplicações tecnológicas em diversos ramos, como na fabricação de dispositivos eletro-ópticos, fibras de alta resistência e sensores de temperatura e pressão (BECHTOLD, 2005).

2.1.2 Cristais Líquidos Liotrópicos

As primeiras observações a respeito de CLLs foram feitas em 1950 por Elliot e Ambrose. Eles observaram a formação de uma fase líquida birrefringente dissolvendo-se poli- γ -benzil-L-glutamato (PBLG) em clorofórmio.

Esses CLs são misturas em solvente, geralmente água, de compostos anfifílicos, que possuem, na mesma molécula, dois grupos com diferentes propriedades de solubilização. A parte da molécula que é altamente solúvel em água é chamada hidrofílica (cabeça polar), enquanto

a parte altamente solúvel em hidrocarbonetos ou solventes não polares é dita hidrofóbica (cauda apolar), como pode ser observado na Figura 7.

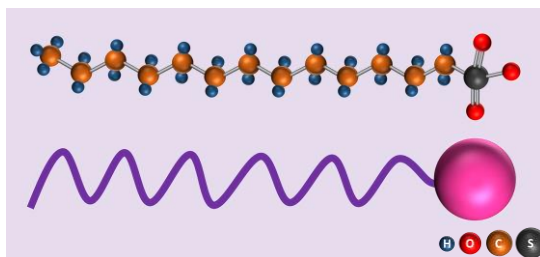


Figura 7: Representação estrutural de uma molécula anfifílica com cabeça polar (rosa) e cauda carbônica apolar (verde).

Nas misturas liotrópicas de moléculas anfifílicas, acima de uma determinada concentração, chamada concentração micelar crítica (CMC), observa-se a formação de aglomerados de moléculas, chamados micelas, que podem assumir formas e dimensões distintas (ECCHER, 2010). Nessas micelas as cabeças hidrofílicas estão em permanente contato com a água, enquanto as caudas hidrofóbicas são mantidas no interior da micela sem contato com o solvente (Figura 8 a). Se o solvente utilizado for não polar, serão formadas as chamadas micelas reversas, nas quais a cauda da molécula fica na parte exterior, em contato com o solvente, e a cabeça polar no interior (Figura 8 b). Vale ressaltar que, mesmo após o aparecimento das micelas, algumas moléculas anfifílicas continuam dispersas na solução.

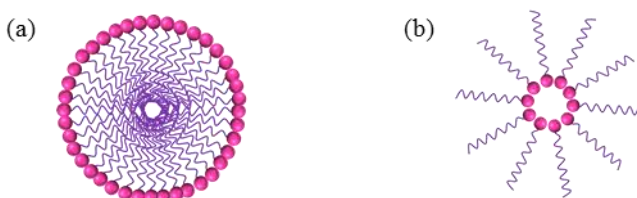


Figura 8: Representação esquemática de (a) micelas e (b) micelas reversas.

Essas micelas não são compostas por um número fixo de moléculas e sua forma geométrica irá depender tanto da estrutura molecular quanto da concentração de monômeros. Quando a CMC é alcançada, as moléculas se auto-organizam esfericamente e, aumentando-

se a concentração, elas podem adquirir a forma de bastão. Para concentrações ainda maiores, haverá a formação de estruturas lamelares.

Os CLLs têm aplicações na nanotecnologia e são encontrados no sabão e nas membranas celulares dos seres vivos, podendo ser utilizados em biossensores. A importância desses CLs está na interdisciplinaridade, por estarem relacionados a áreas como Biologia e Química.

2.2.3 Classificação De Mesofases

De acordo com a anisometria e a organização estrutural de suas moléculas, os CLTs e os CLLs podem apresentar diferentes mesofases dentro de três classes: nemáticas, esmécticas e colestéricas. Essa classificação foi feita em 1922 por Friedel e inicialmente foi atribuída apenas aos termotrópicos, por serem, até então, os únicos CLs conhecidos (ECCHER, 2010). Com o descobrimento dos liotrópicos, eles tiveram suas propriedades similarmente identificadas, apesar das diferenças quanto à natureza e ao processo de obtenção. Desse modo, considerando-se apenas as propriedades de simetria macroscópica que caracterizam as mesofases, as teorias moleculares podem ser aplicadas tanto para os CLTs, quanto para os CLLs.

2.2.3.1 Mesofase nemática

Na mesofase nemática, as moléculas possuem ordem posicional de curto alcance, posicionando-se aleatoriamente em relação aos seus centros de massa, e ordem orientacional de longo alcance, orientando-se, em média, com seus eixos maiores de simetria paralelos entre si em uma dada direção preferencial. Podemos associar a essa direção um vetor unitário \vec{n} , denominado de “diretor”, sendo as direções \vec{n} e $-\vec{n}$ equivalentes (Figura 9). Essa mesofase apresenta fluidez semelhante a de um líquido isotrópico (KROIN, 1985).

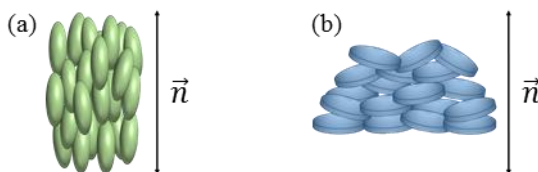


Figura 9: Representação esquemática da mesofase nemática (a) calamítica e (b) discótica.

2.2.3.2 Mesofase esmética

A mesofase esmética, apresentada apenas por CL calamíticos (formato de bastão), é mais organizada que a nemática, e é caracterizada por apresentar moléculas ordenadas em camadas, paralelas entre si, com ordem orientacional bem definida, ao longo de uma direção preferencial dada por \vec{n} , e ordem posicional em, pelo menos, uma direção.

Devido às várias possibilidades de organização orientacional e posicional das moléculas no interior das camadas, existem diversos tipos de mesofases esméticas, que podem ser diferenciadas por letras, desde A até K, dependendo se existe ou não ordenamento e arranjo molecular no interior das camadas. Na Figura 10, são representadas as mesofases esmética A e esmética C. Na mesofase esmética A, não existe ordem posicional das moléculas dentro de cada camada, apenas uma ordem orientacional, dada por \vec{n} , perpendicular às camadas. Na esmética C também não existe ordem posicional dentro das camadas e as moléculas apresentam um ângulo de inclinação α em relação à normal ao plano das camadas.

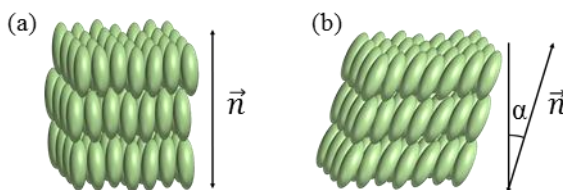


Figura 10: Representação esquemática da (a) mesofase esmética A e da (b) mesofase esmética C, na qual as moléculas apresentam um ângulo de inclinação α em relação à normal ao plano das camadas.

Nos CLLs, a mesofase equivalente à esmética é a lamelar, onde as moléculas anfifílicas formam bicamadas intercaladas por água (ECCHER, 2010).

2.2.3.3 Mesofase colunar

Nas mesofases apresentadas pelos CLTs discóticos, denominadas colunares, as moléculas estão empilhadas umas sobre as outras, formando colunas, as quais podem ser ordenadas ou desordenadas, conforme ilustrado pelas Figura 11(a) e 11(b). As colunas, por sua vez, podem se organizar de diversas maneiras, dando origem a mesofases

colunares hexagonal (Figura 11 c), cúbica, retangular e oblíqua (BUSHBY *et al*, 2013).

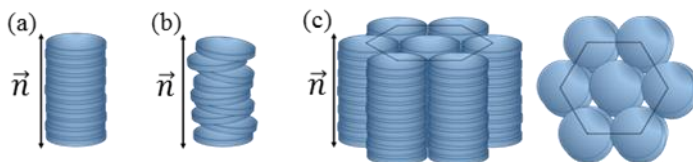


Figura 11: Representação do empacotamento molecular dos CLTs discóticos nas fases colunares (a) ordenada, (b) desordenada e (c) colunar hexagonal com vista superior.

2.2.3.3 Mesofase colestérica

A mesofase colestérica é uma espécie de mesofase nemática composta por moléculas opticamente ativas que apresentam uma direção preferencial média de orientação dada pelo vetor \vec{n} . Também é conhecida como mesofase nemática quiral.

Nessa mesofase as moléculas se organizam em camadas, cada uma com sua ordem orientacional, de modo que o vetor \vec{n} segue uma estrutura helicoidal (Figura 12). A distância necessária para que \vec{n} rotacione de um ângulo de 360° ao longo da estrutura é definida como passo da hélice (p).

Por ser muito sensível a variações de temperatura, o passe da hélice pode fazer com que essas mesofases apresentem uma reflexão seletiva da luz. Assim, essas substâncias podem ser utilizadas como sensores de temperatura, uma vez que apresentam mudança de cor (BECHTOLD, 2005). Sugerimos a leitura do artigo “Cristais Líquidos Colestéricos: a quiralidade revela as suas cores” (ELY *et al*, 2007), publicado pela Química Nova, onde essa propriedade é abordada ao construir um termômetro de CL com mesofase colestérica.

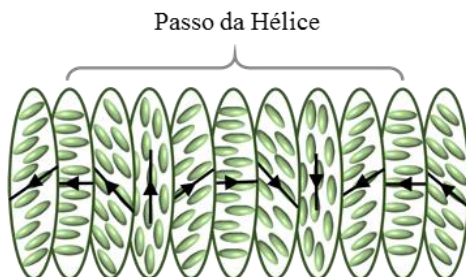


Figura 12: Representação esquemática da mesofase colestérica.

2.3 PROPRIEDADES ÓPTICAS

Nesta seção serão abordadas propriedades ópticas apresentadas pelos CLs que são de extrema importância para o entendimento do funcionamento de displays.

2.3.1 Polarização

O físico escocês James Clerk Maxwell, ao unificar eletricidade, magnetismo e óptica, mostrou que um raio luminoso é uma onda eletromagnética transversal, composto por um campo elétrico e um magnético que oscilam perpendicularmente entre si e entre a direção de propagação do raio (Figura 13). A princípio, além da luz, apenas os raios infravermelhos e ultravioletas eram ondas eletromagnéticas conhecidas. Hoje em dia, sabemos que existe um amplo espectro eletromagnético, sem limites definidos, e que apenas um pequeno intervalo de comprimentos de onda, de 400 a 700 nm, é visível ao ser humano.

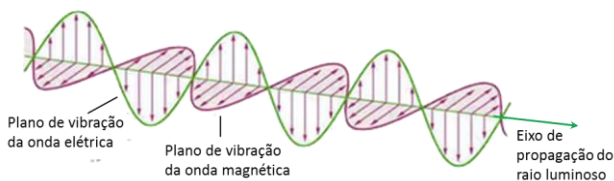


Figura 13: Representação do eixo de propagação de um raio luminoso e de seus planos de vibração elétrica e magnética Fonte: alunosonline.uol.com.br/quimica/luz-polarizada-nao-polarizada.html

A polarização de uma onda eletromagnética pode ser definida de acordo com a direção de oscilação do campo elétrico. Quando essa direção é aleatória, como é o caso, por exemplo, das ondas eletromagnéticas emitidas por uma fonte de luz comum, dizemos que não há polarização. No entanto, é possível polarizar uma luz não polarizada fazendo-a passar por um filtro polarizador, onde as componentes do campo elétrico que forem paralelas à direção de polarização do filtro conseguem atravessá-lo, enquanto as componentes perpendiculares são absorvidas. A luz que sai de um filtro polarizador estará, portanto, polarizada na mesma direção do filtro (Figura 14) e é dita linearmente polarizada. Também é possível polarizar a luz por reflexão e por espalhamento (HALLIDAY, 2009).

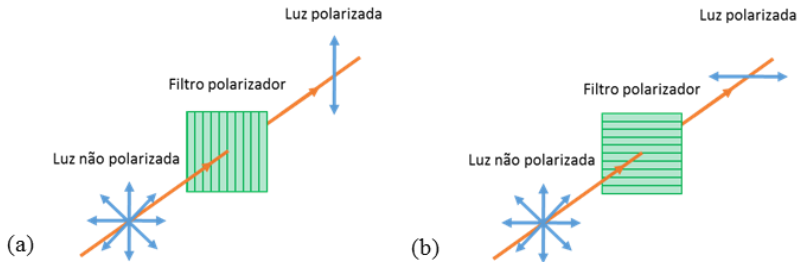


Figura 14: Representação esquemática da polarização da luz na (a) vertical e na (b) horizontal, onde as setas azuis representam a direção de oscilação do campo elétrico.

Quando a luz que incide no filtro polarizador é não polarizada, metade da intensidade (I_0) da onda original é perdida e a intensidade (I) da luz emergente é definida como $I = \frac{1}{2}I_0$. Se a luz incidente for polarizada, a intensidade da luz emergente é dada por

$$I = I_0 \cos^2 \theta. \quad (\text{Lei de Malus})$$

onde θ é o ângulo entre a direção de polarização da luz incidente e a direção do polarizador. Podemos, portanto, controlar a intensidade da luz emergente por meio de uma combinação entre dois filtros polarizadores.

Se posicionarmos dois filtros de maneira que suas direções de polarização fiquem paralelas (Figura 15 a), toda luz que passa pelo primeiro filtro passará também pelo segundo filtro. Se rotacionarmos um dos filtros em 90° (Figura 15 b), fazendo com que as direções de polarização fiquem perpendiculares (cruzadas), nenhuma luz passará pelo segundo filtro. Também podemos pensar no caso em que as direções de polarização dos filtros formam um ângulo entre 0° e 90° (Figura 16 b), de modo que parte da luz que passa pelo primeiro filtro passará pelo segundo filtro de acordo com a Lei de Malus.

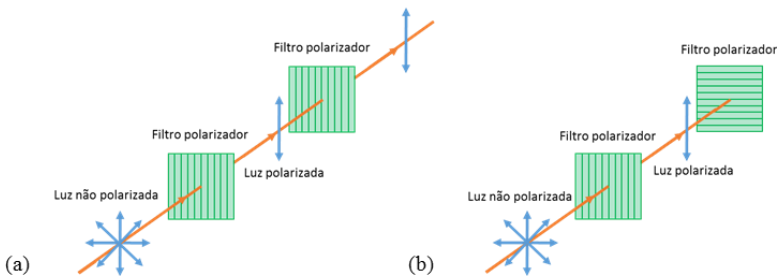


Figura 15: Representação esquemática da polarização da luz com polarizadores (a) paralelos e (b) perpendiculares.



Figura 16: Imagem de flores vistas através de polarizadores (a) paralelos, (b) cruzados de aproximadamente 45° e (c) cruzados de 90° .

2.3.2 Birrefringência

Quando um feixe luminoso passa de um meio para outro, dizemos que ele sofre refração, ou seja, sua velocidade de propagação varia e pode ocorrer um desvio na sua direção de propagação caso o ângulo de incidência não seja perpendicular à superfície que os separa. Chamamos de índice de refração a relação entre a velocidade da luz no vácuo ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s) e a velocidade da luz em um determinado meio.

Substâncias compostas por moléculas anisométricas que exibem algum tipo de alinhamento, apresentam dois índices de refração, tornando-as birrefringentes. Quando um raio de luz incide sobre o meio, o mesmo pode ser decomposto em dois raios com direções de polarização perpendiculares: o raio ordinário, que tem direção de polarização paralela ao eixo óptico do material, e o raio extraordinário, com polarização perpendicular (TIPLER, 2009).

Vimos anteriormente que nenhuma luz é transmitida através de polarizadores cruzados, no entanto, se colocarmos um material birrefringente entre eles, como um CL numa mesofase ordenada nemática, haverá uma defasagem entre as componentes paralela e perpendicular ao eixo óptico, de modo que a intensidade de luz transmitida pelo segundo polarizador é não nula. A Figura 17 ilustra uma amostra de CL na mesofase nemática confinada entre duas lâminas de vidro (região delimitada pelo retângulo vermelho). Em (a) e (b), onde as direções dos dois polarizadores estão paralelas e com ângulo de 45 graus entre si, é possível ver a imagem da tela do celular. Entretanto, em (c) percebe-se que na região de cruzamento dos polarizadores apenas onde está a amostra de CL a imagem é transmitida.

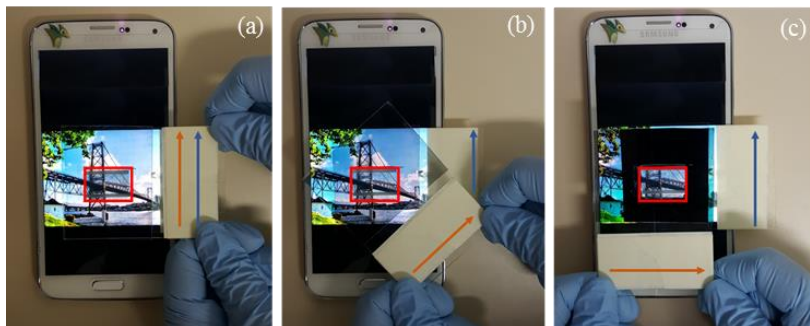


Figura 17: Representação de uma amostra de CL confinada entre duas lâminas de vidro (delimitada pelo retângulo vermelho) entre polarizadores (a) paralelos, (b) com ângulo de 45° entre si e (c) cruzados de 90° .

O mesmo efeito pode ser notado quando um pedaço de fita adesiva (durex) é colado sobre uma lâmina de vidro e disposto entre polarizadores cruzados (Figura 18). A fita adesiva também é birrefringente, resultado do processo de fabricação em que o material polimérico que constitui a fita é estirado e assim produz o ordenamento das cadeias poliméricas.

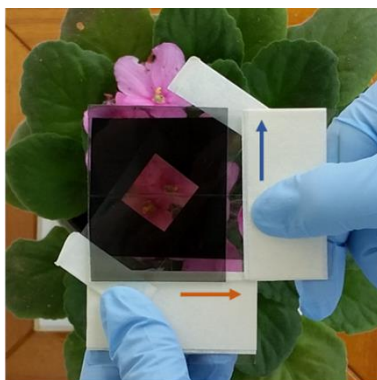


Figura 18: Imagem de flores vistas através de um pedaço quadrado de fita adesiva (durex) entre polarizadores cruzados.

Um equipamento muito utilizado para identificar mesofases líquido-cristalinas é o microscópio óptico de luz polarizada, o qual é constituído de dois polarizadores dispostos ao longo da direção de propagação da luz, com posicionamento da amostra entre eles. Esta situação é idêntica da Figura 17(c), onde o cristal líquido é observado

entre polarizadores cruzados. Portanto, no modo de transmissão, o microscópio permite a observação ampliada de filmes e películas birrefringentes e com isso é possível identificar texturas ópticas específicas de cada tipo de mesofase. A Figura 19 demonstra as diferenças entre as texturas observadas para uma mesofase esmética A e para uma mesofase colunar hexagonal, onde os domínios orientacionais são característicos de cada uma das mesofases.

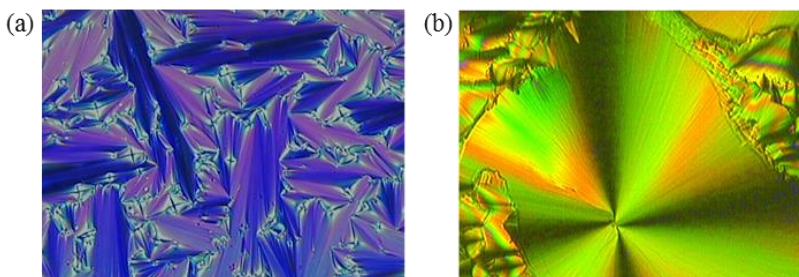


Figura 19: Imagens capturadas por um microscópio óptico de luz polarizada com amostras de cristal líquido entre polarizadores cruzados. (a) mesofase esmética A e (b) mesofase colunar hexagonal.

2.4 INFLUÊNCIAS EXTERNAS SOBRE CRISTAIS LÍQUIDOS

Cristais líquidos são amplamente utilizados em diversas aplicações tecnológicas devido à possibilidade de ajuste das propriedades macroscópicas através da aplicação de estímulos externos. Isso ocorre pois é possível alterar as condições de alinhamento de diferentes maneiras como, por exemplo, através de campos elétricos.

Os CLs se alinham ao longo de um campo externo aplicado devido às propriedades elétricas de suas moléculas. Podemos ver na Figura 6 que as moléculas que compõem um CL possuem uma parte polar e uma cadeia carbônica de natureza apolar. Isso gera um momento de dipolo elétrico nas moléculas que pode ser explorado para gerar ordenamento através de um campo elétrico. Mesmo no caso onde as moléculas não possuem um momento de dipolo permanente, o campo externo pode causar um momento de dipolo induzido (menos intenso que o permanente) devido a pequenas mudanças no arranjo dos elétrons e prótons das moléculas (MOYSÉS, 1998). Nesse sentido, podemos analisar o efeito de um campo elétrico externo nos CLs considerando a interação de um dipolo com um campo elétrico.

A Figura 20 abaixo ilustra as forças experimentadas por cada parte de um modelo de dipolo elétrico na presença de um campo externo uniforme.

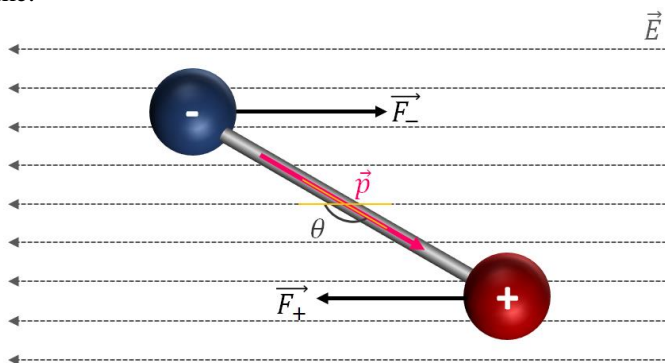


Figura 20: Modelo de dipolo elétrico formado por uma carga positiva e uma negativa, definindo um momento de dipolo elétrico \vec{p} .

Vemos, a partir da análise da figura, que as forças em cada extremidade do dipolo possuem mesmo módulo e direção, definidas pela intensidade do campo elétrico e valor das cargas, mas sentidos diferentes determinados pelo sinal das cargas. Assim, a força resultante sobre um dipolo será nula num campo elétrico uniforme, mas como a força é aplicada em posições diferentes, o dipolo experimentará um torque até que seu momento de dipolo se alinhe na direção do campo, ou seja, quando o ângulo definido entre eles for nulo.

O mesmo tipo de alinhamento pode ser utilizado nos CLs para controlar as propriedades macroscópicas em diversos tipos de aplicações. É válido ressaltar que o campo magnético também é capaz de gerar pequenos momentos de dipolo magnéticos nas moléculas e gerar alinhamento, mas com menor eficácia que os campos elétricos.

Outra maneira interessante de induzir orientações específicas em CLs é por meio de tratamentos especiais da superfície na qual o CL está em contato. Ao introduzir pequenas ranhuras nessas superfícies, as moléculas de CLs calamíticos próximas à superfície se alinham com o eixo maior ao longo da direção das ranhuras (Figura 21) devido a interações na superfície que, em geral, são bastante complexas e ainda não inteiramente compreendidas (BECHTOLD, 2005). Como as moléculas de CL interagem fortemente entre si, esta ordem das moléculas na superfície se propaga para o volume, resultando na orientação da amostra como um todo.

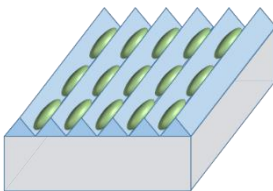


Figura 21: Representação do efeito das ranhuras na organização das moléculas de um CL calamítico.

2.5 FUNCIONAMENTO DE UM DISPLAY DE CRISTAL LÍQUIDO

Uma das aplicações tecnológicas mais comuns dos CLs é o display, também conhecido como LCD (do inglês, *liquid crystal display*), que é amplamente utilizado em dispositivos eletrônicos como monitores de computador, televisores, telas de celular e também em dispositivos mais simples, como calculadoras e relógios digitais.

Essas aplicações geralmente requerem que os CLs sejam confinados entre placas de vidro, usualmente cobertas com algum tipo de polímero que facilita a introdução das ranhuras por meio de esfregamento. Em dispositivos eletrônicos, é comum que seja feita uma montagem com ranhuras perpendiculares em cada um dos vidros que confina o CL, de modo que a direção das moléculas se propaga pela amostra como uma hélice (torção do tipo twist), conforme ilustrado na Figura 22 (BECHTOLD, 2005).

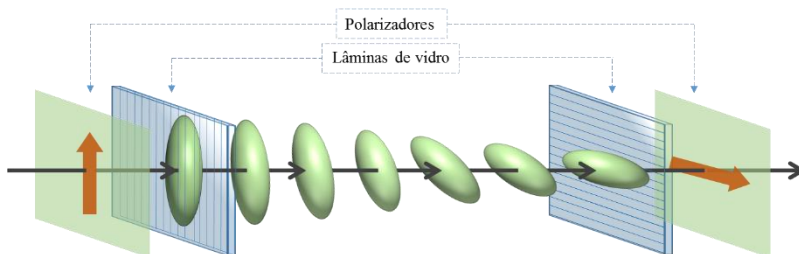


Figura 22: Representação esquemática da torção causada nas moléculas devido às ranhuras microscópicas no substrato.

Nas faces externas das placas dos mostradores de CL ainda são colocados filtros polarizadores, de modo que polarizam linearmente a luz na direção de alinhamento do CL em cada uma das lâminas. Desse modo, a luz que penetra em uma das extremidades com polarização linear

paralela ao tratamento de superfície, segue a direção do eixo óptico do CL e consegue passar pelo segundo polarizador (Figura 22).

Se uma diferença de potencial for aplicada entre as placas, o campo elétrico produzido irá alinhar as moléculas perpendicularmente às superfícies de contorno, de modo que o eixo óptico do CL não influencie a direção de propagação da luz proveniente de uma das extremidades (Figura 23). Nesse caso, como os polarizadores estão cruzados, não há passagem de luz de uma extremidade a outra. Nas telas de CL, cada ponto luminoso (*pixel*) consiste de um dispositivo que permite ou não a passagem de luz por meio de tensões elétricas direcionadas em pontos específicos, de modo que é possível fazer um ajuste *pixel a pixel* e formar uma imagem.

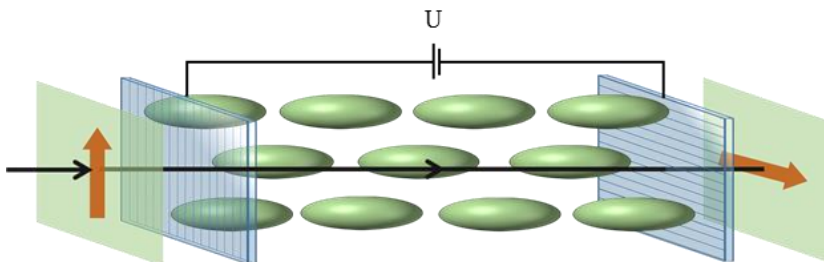


Figura 23: Representação esquemática do alinhamento das moléculas promovido pela diferença de potencial aplicada.

Em displays monocromáticos, como os usados em calculadoras e relógios digitais, existem apenas dois estados de funcionamento, *on* (acesso) e *off* (apagado), originando a imagem de contraste. Na Figura 24, que mostra um display desse tipo, podemos ver pequenas matrizes 6×5 de *pixels* na parte superior e outros *pixels* pela tela em diferentes formatos. Para gerar, por exemplo, a imagem do número 1 nas matrizes superiores, foram ativados 9 *pixels*, enquanto que para o número 8 são necessários 15 *pixels* ativos.

No caso de displays coloridos, em geral divide-se cada *pixel* em três *sub-pixels*, utilizando filtros com as cores vermelho, azul e verde (chamado de padrão RGB). A cor final transmitida pelo *pixel* deve-se ao agrupamento da intensidade das cores individuais que, por sua vez, é determinada pela aplicação de diferentes tensões pelos eletrodos nos *pixels* (BECHTOLD, 2005).



Figura 24: Display de calculadora onde é possível ver *pixels* ativos e não ativos.

Os LCDs também podem ser diferenciados em reflexivos ou transmissivos. Nos reflexivos, como nos mostradores de calculadoras e relógios digitais, é a luz proveniente do exterior que, refletida por um espelho implantado no fundo da tela, gera a imagem. Já nos transmissivos, mais utilizados em LCDs coloridos, como o de celulares e notebooks, a imagem é gerada por uma iluminação no fundo da tela, chamada de backlight, geralmente proveniente de LEDs (Diodo Emissor de Luz).

3. APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA

3.1 SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES

A sequência de atividades a seguir foi elaborada com o objetivo de proporcionar um ensino de Física contextualizado, trabalhando conjuntamente tópicos de Física Clássica e de FMC, visando auxiliar os professores que estão em busca de novas estratégias de ensino.

Os conteúdos selecionados são: polarização, birrefringência, transições de fases, interação de um dipolo elétrico com um campo elétrico uniforme, Cristais Líquidos e funcionamento de um LCD. Além desses, serão sugeridos, de maneira menos detalhada, outros conteúdos com os quais é possível trabalhar.

As atividades foram elaboradas para turmas de 2º e 3º ano do EM, não havendo restrições para tamanho de turmas, pois as atividades são facilmente adaptáveis ao número de alunos. Além disso, a SA não prevê uma duração em horas/aula e nem um momento específico para o início das atividades, de modo que cada professor consiga encaixar as intervenções de acordo com as necessidades de cada turma. É possível, aliás, que a SA sirva de apoio para a elaboração das aulas em mais de um momento, podendo ser utilizada durante um período mais extenso, uma vez que não se trata de uma sequência linear.

3.1.1 Objetivos

- Trabalhar conjuntamente conceitos de Física Clássica e FMC de maneira contextualizada, despertando o interesse dos alunos;
- Relacionar situações e fenômenos presentes no cotidiano com os conceitos físicos desenvolvidos em sala de aula;
- Favorecer a formação de um cidadão com pensamento crítico, capaz de compreender e se posicionar diante de questões científico-tecnológicas da atualidade;
- Promover situações-problema que, ao serem resolvidas, introduzam novos conceitos;
- Proporcionar diálogos e discussões entre alunos e incentivar o trabalho em equipe.

3.2 MÓDULOS

3.2.1 Módulo 1: pré-teste

Esta etapa inicial é fundamental para organizar o desenvolvimento da SA, pois será o momento em que o professor irá identificar e ter clareza das concepções iniciais dos alunos, de modo que possa adaptar os módulos à necessidade e realidade de sua turma.

A seguir apresentamos um questionário composto por 10 perguntas envolvendo conceitos básicos necessários para realizar as atividades propostas. Recomenda-se que essa atividade seja realizada individualmente.

Questionário:

1. Quais são os possíveis estados em que a matéria pode ser encontrada?
2. Por que as substâncias mudam de estado físico?
3. Em quais situações do seu cotidiano você consegue identificar a presença de ondas? Como se classificam essas ondas?
4. Como podemos classificar uma onda em relação a sua direção de vibração? Explique a diferença e dê exemplos.
5. É possível determinar uma direção de vibração preferencial para as ondas? Se sim, explique como, caso contrário explique o porquê.
6. Quando uma onda passa de um meio para outro, podem ocorrer diversos fenômenos. Quais são eles?
7. Comente a respeito da luz e suas propriedades.
8. A velocidade de uma onda depende do meio no qual ela se propaga. É possível, para um mesmo material, que uma onda apresente mais de uma velocidade de propagação? Explique.
9. Represente a ação de um campo elétrico uniforme sobre:
 - a) uma partícula carregada positivamente.
 - b) uma partícula carregada negativamente.
10. Dê exemplos de aplicações tecnológicas de seu cotidiano onde se observa o efeito do campo elétrico.

O professor pode escolher as questões que achar mais pertinentes para sua turma, podendo também elaborar outras, mas sugerimos a aplicação das questões 1 a 8 para o 2º ano e as questões 3 a 10 para o 3º ano.

Por se tratar de um questionário que visa identificar as concepções iniciais dos alunos, não serão disponibilizadas respostas a essas questões, pois não se trata de certo ou errado, mas sim de uma análise mais aprofundada. Nesse contexto, iremos discutir brevemente cada uma delas, no intuito de auxiliar o professor na realização dessa análise.

Nas duas primeiras questões, que tratam do tópico de transições de fase, o enfoque é identificar, além das dificuldades, possíveis acenos a estados da matéria diferentes dos comumente conhecidos (sólido, líquido e gasoso). As questões 3, 4, 5 e 6 tratam de ondas e polarização. Nessas questões, o professor identificará se os alunos conseguem introduzir o conceito de polarização e se têm clara a diferença entre ondas transversais e longitudinais, entre ondas mecânicas e eletromagnéticas e entre ondas uni, bi e tridimensionais.

As questões 7 e 8 também se enquadram no tópico de ondas, mas estão mais voltadas para ondas eletromagnéticas, visando identificar o conhecimento dos alunos a respeito da luz e de suas propriedades, além de suas concepções prévias a respeito da birrefringência. Finalmente, as questões 9 e 10 tratam da interação da matéria com um campo elétrico.

Analisando as respostas, o professor irá perceber qual o nível de compreensão dos alunos em relação a cada tópico e, conseqüentemente, quais os obstáculos que devem superar para compreendê-los.

Novamente, a ideia não é seguir rigorosamente a SA proposta, como um roteiro, é preciso vê-la como um guia para ajudar na elaboração das aulas, de modo que seja adequada às necessidades de cada turma.

3.2.2 Módulo 2: desafios

Após analisar as respostas do pré-teste e identificar as concepções prévias da turma, é possível introduzir os quatro tópicos propostos por meio de desafios. Nessa etapa, os alunos serão estimulados a resolver situações-problema, expondo e defendendo suas opiniões a respeito de determinados conceitos. As atividades poderão ser realizadas tanto em grupo quanto individualmente.

Essas práticas investigativas constituem um dos eixos formativos a partir dos quais estão organizados os objetivos de aprendizagem e desenvolvimento da Física de acordo com a BNCC (BRASIL, 2016), que

aponta a importância desses processos para fugir da memorização e aplicação exaustiva de equações em exercícios padronizados. A ideia é estimular os alunos a formular hipóteses e enfrentar problemas abertos e contextualizados.

Trabalhando com transições de fase.

Esse desafio tem como objetivo introduzir aos alunos o conceito de estados intermediários da matéria.

A maioria dos alunos provavelmente terá respondido à questão 1 do pré-teste citando os estados sólido, líquido e gasoso. Partindo disso, comece o desafio solicitando que os alunos deem exemplos desses estados da matéria. Em seguida, proponha uma lista de sistemas que se encontram em estados intermediários da matéria para que sejam classificados, como, por exemplo, espuma de barbear, gelatina, gel para cabelo, sorvete, maionese, claras em neve, etc. Nesse momento, o aluno irá perceber que os estados da matéria que ele citou anteriormente não são suficientes para responder esse novo desafio.

Transcorrido tempo suficiente para que todos os alunos tentem resolver a situação problema acima, solicite que exponham suas respostas, comparando-as e induzindo-os a defender suas ideias. Em seguida, iremos introduzir o conceito de estados intermediários da matéria, citando, por exemplo, espumas, emulsões coloidais, fluidos complexos, matéria mole, etc.

Para iniciar a discussão sobre transições de fase e introduzir os CLs, pode-se mostrar o vídeo disponível em <https://youtu.be/uoDPrGu9eWs> em que é possível ver um CL sendo aquecido e transitando desde a fase sólida cristalina até o líquido isotrópico. Faça os alunos notarem que, entre essas duas fases, o material apresenta uma outra fase, que é facilmente observada pela sua coloração turva. Pode-se comparar esse CL com um cubo de gelo e perguntar aos alunos se esse fenômeno ocorre também nesse caso, assim, eles irão perceber que, ao contrário do CL, o gelo passa da fase sólida diretamente para a fase líquida isotrópica. A partir disso, iniciaremos a discussão sobre transições de fase perguntando aos alunos a razão pela qual essa transformação ocorre nos materiais.

Sugerimos tratar o tópico não só a partir da variação dos parâmetros de temperatura e pressão, como geralmente é feito, mas fazer também uma abordagem voltada para as interações intermoleculares. Essa atividade pode ser uma proposta interdisciplinar, trabalhando junto ao professor de química.

Como ferramenta para trabalhar as interações intermoleculares e, a partir disso, as transições de fase, sugerimos a simulação do PhET Colorado disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/atomic-interactions>. A Figura 25 mostra a interface da simulação, que nos apresenta um gráfico do potencial de Lennard-Jones, onde é possível mudar alguns parâmetros, como os átomos envolvidos e a profundidade do poço de potencial. Também é possível optar por exibir ou não setas representativas das forças envolvidas.

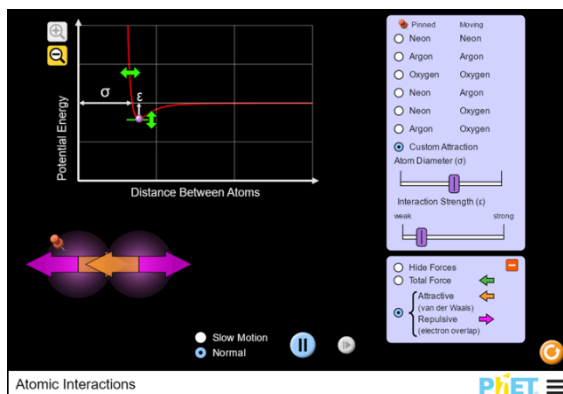


Figura 25: Interface da simulação sobre interações intermoleculares do site PhET Colorado.

Terminada a discussão sobre transições de fase, volta-se aos CLs, para fazer uma abordagem mais detalhada, enfatizando as características e as propriedades físicas que possuem por se apresentarem num estado intermediário entre o sólido cristalino e o líquido isotrópico. Cabe ao professor decidir o grau de aprofundamento desse tema, mas é recomendável introduzir o básico necessário para que os alunos compreendam o papel do CL em um display.

Trabalhando com polarização

Nesse desafio os alunos irão classificar a luz como uma onda transversal e, além de introduzir o conceito de polarização, o professor pode trabalhar com ondas eletromagnéticas.

Comece solicitando que os alunos imaginem uma corda com uma de suas extremidades fixa e a outra sendo balançada por alguém. Em seguida, pergunte o que aconteceria se a corda passasse por uma fenda que tem a mesma direção do plano de vibração da corda. E o que

aconteceria se, ao invés de estar na mesma direção, a fenda estivesse perpendicular ao plano de vibração da corda. O professor pode desenhar o início das diferentes situações, ou seja, antes da corda passar pela fenda, para facilitar a visualização.

Na Figura 26 estão representadas duas situações que podem ser exploradas nessa primeira etapa. Uma onda transversal em uma corda vibrando verticalmente, ao passar por uma fenda paralela à sua direção de vibração, irá passar pela fenda sem sofrer alterações (Figura 26 a). Se a fenda for perpendicular à direção de vibração da onda, ela será anulada (Figura 26 b). Também pode-se pensar no caso em que a corda está vibrando horizontalmente.

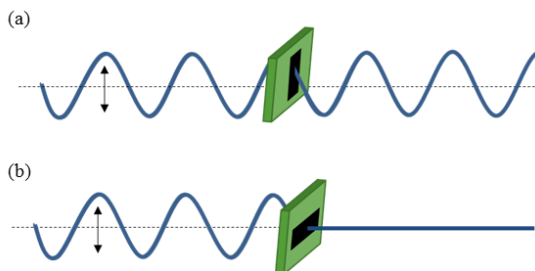


Figura 26: Representações de uma onda transversal em uma corda vibrando verticalmente, passando por uma fenda (a) vertical e (b) horizontal.

Após disponibilizar tempo suficiente para que todos os alunos tentem responder o desafio, solicite que façam o mesmo exercício, mas pensando agora em uma onda longitudinal, como, por exemplo, o som. Na Figura 27 estão representadas as duas situações que podem ser exploradas. Nesse caso, tanto a onda que irá passar pela fenda na vertical (Figura 27 a), quanto a onda que irá passar pela fenda na horizontal (Figura 27 b) não irão sofrer qualquer alteração. Com esses exercícios, é possível concluir que o efeito de polarização de ondas ocorre apenas para ondas transversais.

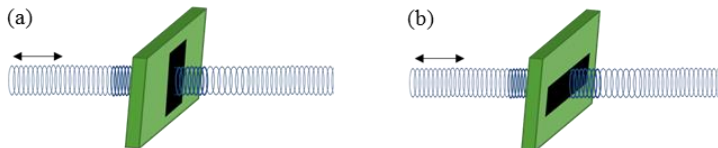


Figura 27: Representação de uma onda longitudinal passando por uma fenda (a) vertical e (b) horizontal.

Após realizar esses desafios, pode-se introduzir o conceito de polarização e explicar que, nos exemplos vistos para as ondas transversais, as ondas já estavam polarizadas. Pode-se fazer, em seguida, exercícios onde uma onda não polarizada passa por uma fenda vertical ou horizontal.

Para introduzir a polarização na luz, é possível realizar simples experimentos utilizando dois polarizadores lineares (polaróides). Mostre aos alunos que a luz passa ao incidir em um polarizador com sua direção de polarização na vertical e que o mesmo acontece se utilizarmos um polarizador rotacionado de 90° . Pergunte aos alunos em qual tipo de onda eles classificariam a luz, baseados nesse experimento.

Em seguida, mostre o que acontece ao utilizar os dois polarizadores juntos, com suas direções de polarização cruzadas de 90° entre elas (Figura 16 c). Peça que os alunos tentem explicar o que ocorre nesse caso e, em seguida, relacione a luz com a onda transversal não polarizada dos exercícios anteriores. Como a luz foi polarizada e sabendo que a polarização é um fenômeno exclusivo das ondas transversais, podemos concluir que a luz também é uma onda transversal. Vários exemplos podem ser utilizados nessa etapa, como, por exemplo, os óculos de sol ou até mesmo os óculos 3D com sistema de polarização.

Nesse momento, também é possível introduzir a Lei de Malus, para que os alunos consigam calcular a intensidade da luz que atravessa os polarizadores, e as ondas eletromagnéticas.

Trabalhando com birrefringência

Nesse desafio será introduzido o conceito de birrefringência. Sugerimos que ele seja realizado em sequência ao desafio da polarização, caso não tenha optado por realizá-lo, sugerimos que pelo menos a etapa final, de polarização da luz, seja revisada.

Para iniciar esse desafio, iremos retomar a situação final do desafio anterior, com dois polarizadores cruzados, e iremos colocar entre eles um material birrefringente, uma fita durex, por exemplo. Nessa configuração, haverá a passagem de luz entre os polarizadores, mesmo estando cruzados (Figura 18). Solicite que os alunos tentem explicar por que isso acontece.

Em seguida, coloque um material que não seja birrefringente, uma lâmina de vidro, por exemplo, e mostre que nessa configuração não haverá passagem de luz. Novamente, deixe que os alunos tentem explicar o ocorrido. É possível fazer mais exemplos desse tipo, apenas trocando o material inserido entre os polarizadores.

Para introduzir o conceito de birrefringência, pode ser necessário fazer uma revisão de refração, para que os alunos entendam que, os materiais birrefringentes apresentam dois índices de refração. Nesse momento, pode-se voltar aos CLs, introduzindo-os agora como birrefringentes e explicando que essa propriedade se deve ao formato de suas moléculas. Também pode-se fazer a mesma explicação para a fita durex (ver capítulo 2).

Trabalhando com interação dipolo-campo elétrico

Nesse desafio, iremos introduzir o conceito de dipolo elétrico e iremos explorar sua interação com um campo elétrico uniforme.

Comece solicitando aos alunos que representem a interação de uma carga puntiforme positiva com um campo elétrico uniforme, indicando a força elétrica. Em seguida, peça que repitam o procedimento, mas com uma carga puntiforme negativa. Imaginando um halter, onde numa extremidade temos carga positiva e, na outra, carga negativa, peça que representem a interação que irá ocorrer caso esse halter se encontre num campo elétrico uniforme. Nesse momento, podem ser resolvidos alguns exercícios onde o halter se encontra em diferentes posições e é preciso encontrar a posição de equilíbrio.

Introduziremos o dipolo elétrico mostrando que, devido à disposição de seus átomos, algumas moléculas apresentam uma região eletrizada positivamente e outra região eletrizada negativamente. Mais uma vez é possível realizar um trabalho interdisciplinar com a química, trabalhando com mais detalhes as ligações moleculares, caso contrário, podemos usar o exemplo da água.

Mostre aos alunos a representação de uma molécula de água, explicando que, devido ao fato de suas ligações covalentes formarem um ângulo de aproximadamente 104° (Figura 2 a), a água também apresenta essa diferença de disposição de elétrons na estrutura da molécula, já que o átomo de oxigênio, que é mais eletronegativo, tende a atrair elétrons dos átomos de hidrogênio. Mostre, então, que essa molécula de água pode ser representada pelo halter do exercício anterior e que, portanto, quando é colocada na presença de um campo elétrico intenso, suas moléculas tendem a girar e se alinhar com o campo.

Nesse ponto, pode-se imaginar vários dipolos (halters) distribuídos aleatoriamente e, após aplicar um campo elétrico, pedir que os alunos representem a interação entre eles. A compreensão desse desafio, além de ser essencial para compreender como é possível “ligar” e “desligar” o dispositivo que iremos construir, também abre margem para

trabalhar com o funcionamento de um microondas e como ele aquece apenas alimentos que contém moléculas polares.

3.2.3 Módulo 3: construção de um display de cristal líquido

Dando continuidade ao estudo dos tópicos apresentados anteriormente, é proposta uma atividade prática onde é construído um display simples de CL.

Materiais necessários:

- Duas lâminas de vidro revestidas de ITO (Indium Tin Oxide) com tamanho aproximado de 2,5 cm x 1,5 cm (caso queira uma região ativa maior, basta utilizar lâminas maiores).
- Solução de poli(imida) (PI) ou álcool polivinílico (PVA).
- Um pedaço de veludo.
- Espaçadores de mylar ou papel celofane com 10 – 20 μm de espessura (é importante que a espessura não ultrapasse muito esse valor).
- Cola epóxi (Araldite) de secagem rápida (10 min.).
- Uma bateria de 9 V.
- Dois pedaços de fio para ligações elétricas com garras (tipo jacaré) em cada uma das extremidades para possibilitar o contato.
- Cristal líquido termotrópico [4-pentyl-4'-cyanobiphenyl] conhecido como 5CB ou o cristal líquido E7. Estes apresentam a mesofase nemática na temperatura ambiente.
- Dois pedaços de polaróide (polarizador linear) do mesmo tamanho das lâminas de vidro.

Observações sobre os materiais:

O ITO é um material transparente condutor depositado sobre lâminas de vidro que permitirá a aplicação de tensão entre elas. Estas podem ser adquiridas no site <https://www.aliexpress.com/popular/ito-conductive-glass.html>.

O PVA pode ser encontrado na forma de pó em várias homepages ou em casas de construção.

Ambos os CLs podem ser obtidos na empresa Merck.

Os polaróides, polarizadores lineares de baixo custo, podem ser adquiridos em <http://www.polarizingsheet.com/lcdpolarizingsheet.php>.

Maiores detalhes sobre a aquisição dos itens e construção desse dispositivo podem ser obtidos no Laboratório de Optoeletrônica Orgânica e Sistemas Anisotrópicos (LOOSA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Outras informações podem ser encontradas no site <http://loosa.paginas.ufsc.br/loosa/>. É importante lembrar que a Universidade é um espaço acessível ao público que oferece diversas oportunidades de interação dos alunos e professores do EM com o ambiente acadêmico, como é o caso do Observatório Astronômico (<http://observatorio.ufsc.br/>), do Laboratório de Instrumentação, Demonstração e Exploração (Labidex) e de feiras como as realizadas pela Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão (SEPEX).

Procedimentos experimentais:

- Lave as lâminas com detergente e enxague em água corrente, em seguida enxague com álcool e novamente com água.
- Dissolva o PI em 1-methyl-2-pyrrolidone (NMP) ou o PVA em água, numa concentração de 2% (massa).
- Faça a deposição da solução sobre o ITO por *spin-coating* a 3000 rpm durante 30 s para obter um filme homogêneo com aproximadamente 200 nm de espessura. Em seguida, coloque o filme em uma estufa a 80 °C por uma hora. Caso não tenha acesso a um equipamento de *spin-coating*, é possível utilizar a técnica de *casting*, que consiste em depositar uma gota da solução sobre a lâmina (de forma que cubra toda a área da lâmina) e deixando evaporar o solvente a temperatura ambiente. Para que o filme formado seja homogêneo e uniforme, é importante que a lâmina utilizada como substrato fique imóvel até a evaporação completa do solvente.
- Envolve o pedaço de veludo em um objeto cilíndrico (use, por exemplo, o marcador para quadro branco) e, em seguida, escolha uma direção e deslize-o sobre o filme polimérico pressionando levemente. Repita 3 ou 5 vezes esse processo para cada lâmina.
- Para preparar a celinha, posicione as lâminas de modo que as ranhuras dos filmes fiquem perpendiculares e de frente uma para a outra. Coloque o espaçador de mylar nas duas laterais

de uma das lâminas e, enfim, sobreponha-as de modo que fiquem levemente deslocadas (Figura 28). Para finalizar, cole as laterais utilizando cola epóxi e aguarde até a secagem completa.

- Coloque uma pequena gota do CL em uma das extremidades da celinha e aguarde até que toda ela fique preenchida.
- Os filtros polarizadores devem ser afixados nas faces externas das lâminas de modo que seus eixos ópticos fiquem paralelos à direção de esfregamento de cada lâmina. Confira a ordem em que os materiais ficarão posicionados quando a montagem do dispositivo estiver concluída na Figura 29.
- Utilize os fios para fazer contato entre o dispositivo e a bateria. Limpe uma pequena parte do filme polimérico em cada extremidade da celinha e coloque uma garra em cada ponto, em seguida, ligue as outras duas garras nos pólos da bateria.

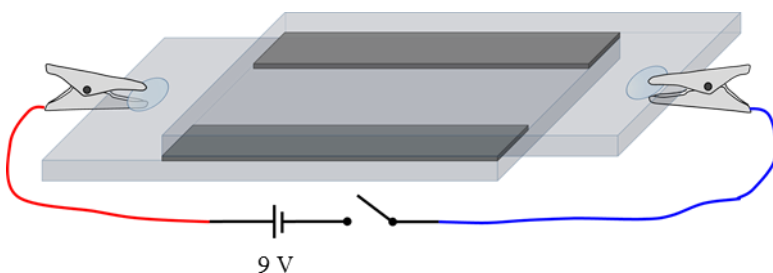


Figura 28: Representação esquemática da montagem da celinha.



Figura 29: Representação esquemática da ordem dos materiais ao final da montagem do dispositivo.

A montagem do display pode ser realizada com toda a turma ou em grupos, dependendo da disponibilidade dos materiais. Durante os procedimentos experimentais, é importante que o professor acompanhe os alunos, explicando a função de cada componente (essas informações foram apresentadas no capítulo 2).

Como vimos, o funcionamento de um display é bastante simples e envolve conceitos de fácil compreensão. No entanto, devemos mostrar aos alunos que para a construção de uma tela de CL o processo é muito mais complexo, pois cada ponto luminoso (*pixel*) consiste de um dispositivo como o que foi montado nesse módulo (Figura 24). Dessa forma, o problema passa a ser de microeletrônica, para direcionar as tensões elétricas nos pontos específicos que devem permitir ou não a passagem de luz.

Além dessas atividades, é possível realizar a desmontagem de LCD de aparelhos danificados como calculadoras e relógios digitais, por exemplo. Essa abordagem é realizada por Laburú *et al* no artigo “Mexendo com Polaróides e Mostradores de Cristais Líquidos” publicado no Caderno Catarinense de Ensino de Física. Por ser um artigo didático, também existe a possibilidade de discutí-lo em sala de aula com os alunos, proporcionando a divulgação de textos científicos.

3.2.4 Módulo 4: vídeos

Caso não tenha oportunidade de realizar a montagem em sala de aula, é possível ter acesso a um vídeo explicativo que demonstra cada passo da montagem, possibilitando que as atividades sejam realizadas mesmo na ausência do módulo experimental. O vídeo, disponível em <https://youtu.be/9AUyLZtI6j0> (acesso em 14 dez. 2016) também é útil para guiar os alunos que forem realizar a montagem.

Além desse, sugerimos que os dois vídeos a seguir sejam exibidos e discutidos em sala de aula para melhor entendimento do funcionamento de um display de CL. O primeiro, disponível apenas em inglês em <https://youtu.be/k7xGQKpQAWw> (acesso em 14 dez. 2016), apresenta a configuração de um LCD, explicando o papel de cada componente. Primeiro mostra como o plano da luz é polarizado e, consequentemente, bloqueado pelos polarizadores e como o CL atua de modo a causar sua rotação de 90°, permitindo a passagem de luz. Também é mostrado o efeito da aplicação de uma tensão entre as lâminas e como isso é utilizado para regular o funcionamento e a intensidade das cores do display.

No segundo vídeo, que possui legenda em português, acessível em <https://youtu.be/HQc9TIGyYkM> (acesso em 14 dez. 2016), um monitor

de LCD é desmontado e, ao ser remontado, suas peças são apresentadas e explicadas uma a uma. Apesar de os conteúdos serem praticamente iguais, os vídeos apresentam abordagens completamente diferentes. Sugerimos que o primeiro vídeo seja usado para auxiliar as explicações do professor durante os desafios, enquanto que o segundo vídeo seja exibido antes das atividades escritas, servindo como uma base adicional aos alunos.

3.2.5 Módulo 5: relatório

Como atividade avaliativa, sugerimos aplicar o relatório a seguir, tanto para turmas que realizaram a montagem, como para as turmas que apenas acompanharam os processos pelos vídeos. Sugerimos que essa atividade seja realizada em grupo.

Questões teóricas:

1. Considere uma montagem na qual dois polarizadores são posicionados e formam um ângulo θ entre suas direções de polarização. Um feixe de intensidade I_0 atravessa o sistema e a intensidade é medida após a passagem pelo segundo polarizador. Quais são os valores de θ para os quais a intensidade do feixe transmitido são, respectivamente, mínima e máxima? E quais serão os valores de intensidade medidos em cada um dos casos?
2. Descreva, indicando as direções de polarização, o que ocorre quando um feixe de luz atravessa dois polarizadores cruzados ($\theta = 90^\circ$). Você consegue pensar numa situação que permita a passagem de luz sem modificar o ângulo dos polarizadores? Como?
3. Considere duas cargas de mesmo módulo e sinais opostos (Q e $-Q$) mantidas a uma distância fixa d por uma barra rígida. Esse sistema é inserido, livre para girar e se movimentar, numa região com campo elétrico uniforme. Represente as forças que agem sobre as cargas e tente definir a posição de equilíbrio. De que forma esse sistema se relaciona com os CLs?

Questões experimentais:

1. Materiais que apresentam propriedades físicas, dependendo da direção de análise, são ditos

anisotrópicos. Dê um exemplo deste tipo de material e explique de onde se origina essa dependência direcional.

2. Qual a função do revestimento de ITO nas lâminas utilizadas na confecção do display? Quais as principais características que levam à sua escolha?
3. O veludo é utilizado para introduzir ranhuras no filme polimérico depositado sobre a lâmina. Explique porque elas são importantes e de que forma atuam sobre o CL.
4. Por que a espessura dos espaçadores laterais deve ser limitada?
5. O display construído se baseia no fato de que a introdução de um material birrefringente entre dois polarizadores cruzados de 90° permite a passagem de luz. Por que se utiliza um CL e não outros materiais birrefringentes?

Respostas das questões teóricas:

1. Esse sistema descreve exatamente o que o cientista francês Étienne-Louis Malus estudou e deu origem à conhecida lei de Malus. No primeiro polarizador, temos a incidência de luz não polarizada, neste caso, o feixe transmitido será linearmente polarizado e sua intensidade será $I_0/2$. No segundo polarizador, a intensidade do feixe transmitido dependerá do ângulo θ . Se $\theta = 0^\circ$, toda a intensidade incidente será transmitida, ou seja, $I_0/2$. A transmissão mínima ocorre quando os polarizadores estão cruzados ($\theta = 90^\circ$), e a intensidade é nula.
2. Em polarizadores cruzados, o feixe de luz que passa pelo primeiro polarizador tem uma direção de polarização que não pode atravessar o segundo polarizador, conforme mostrado na Figura 15 (b). É possível que haja passagem de luz caso se insira um material birrefringente entre os dois polarizadores, pois eles alteram o estado de polarização da luz.
3. As forças que agem sobre as cargas estão representadas na Figura 20. Vê-se, a partir da análise vetorial, que a posição de equilíbrio se dá quando o momento de dipolo

(que aponta da carga negativa para a positiva) tem mesma direção e sentido do campo elétrico. Nos CLs, as moléculas podem ser representadas, de forma simplificada, por um dipolo elétrico, indicando que elas podem ser orientadas através da aplicação de um campo elétrico.

Respostas das questões experimentais:

1. CLs são exemplos de materiais que apresentam anisotropia óptica. Essa propriedade é chamada de birrefringência e advém do fato de que as moléculas que compõem um CL são anisométricas, de forma que a propagação da onda eletromagnética depende da direção do campo elétrico em relação a organização molecular.
2. O revestimento de ITO (Indium-Tin Oxide) nas lâminas de vidro permite a aplicação de um potencial elétrico entre as lâminas, e consequente orientação das moléculas pelo campo elétrico gerado. Ele é escolhido por ser um material com alta condutividade e com alta transparência à luz visível.
3. As ranhuras definem as condições de contorno de superfície e são responsáveis pelo alinhamento das moléculas de CL (Figura 21). Sua influência sobre o funcionamento do display está ilustrada na Figura 22 e na Figura 23.
4. A espessura dos espaçadores laterais define, nesse caso, a espessura do filme de CL. Se esse filme for muito espesso, o alinhamento das moléculas de CL devido às condições de contorno (ranhuras) não consegue se propagar ao longo de todo o volume, influenciando no funcionamento do display.
5. A função do CL é permitir, ou não, a passagem de luz pelo dispositivo. Isso ocorre pela possibilidade de alinhamento das moléculas em forma de hélice ao longo do dispositivo através do tratamento da superfície com ranhuras em direções perpendiculares em cada uma das lâminas e posterior quebra deste alinhamento pela

aplicação de um campo elétrico (ver Figura 23). Sendo que os polarizadores precisam estar devidamente posicionados com o eixo de polarização paralelo ao alinhamento do CL em cada uma das lâminas.

3.2.6 Módulo 6: teste pós-atividades

Como módulo final, sugerimos a reaplicação das questões utilizadas no pré-teste. Essa atividade permitirá ao professor verificar se a SA contribuiu de alguma maneira no processo de aprendizagem dos alunos a respeito dos tópicos escolhidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi elaborar uma SA para promover a inclusão da FMC em sala de aula de maneira contextualizada e visando auxiliar os professores que estão em busca de novas estratégias de ensino, mesmo diante de tantos obstáculos.

Dentro do tema cristais líquidos e displays, os conteúdos selecionados, polarização, birrefringência, transições de fases, interação de um dipolo elétrico com um campo elétrico uniforme e funcionamento de um LCD, foram tratados com diferentes metodologias de ensino e relacionados com situações e fenômenos presentes no cotidiano.

De modo geral, acreditamos que este trabalho contribui para a abordagem de tópicos de FMC no ensino médio, a partir da compreensão do funcionamento de um display de cristal líquido, presente no dia a dia dos estudantes, onde são explorados os materiais e conceitos físicos inerentes ao seu funcionamento.

As atividades propostas promoveram situações-problema que proporcionam diálogos e discussões entre alunos, incentivando o trabalho em equipe e favorecendo a formação de um cidadão com pensamento crítico, capaz de compreender e se posicionar diante de questões científico-tecnológicas da atualidade. Além disso, um dos enfoques principais da SA foi trabalhar as concepções prévias dos estudantes.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, L. Q. **Entre Sólidos e Líquidos**: uma visão contemporânea e multidisciplinar para formação de professores e divulgação do conhecimento. Primeira edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014. 268 p.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Chemical Principles**: the quest for insight. Quinta edição. Nova Iorque: W. H. Freeman and Company, 2010. 830 p.
- BECHTOLD, I. H. Cristais Líquidos: um sistema complexo de simples aplicação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 3, p. 333-342, Agosto 2005.
- BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular**: proposta preliminar, segunda versão revista. Brasília, 2016.
- BRASIL. **Guia de Livros Didáticos PNLD 2015**: Ensino Médio – Física. Brasília, 2014.
- BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio)**. Ministério da Educação. Brasília, 2000.
- BRASIL. **PCN+ Ensino Médio**: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 2002.
- BUSHBY, R. J.; KELLY, S.M.; O'NEILL, M. **Liquid Crystalline Semiconductors**: Materials, Properties and Applications. Dordrecht: Springer, 2013. 272 p.
- ECCHER, J. **Estudo de Mesofases Líquido-cristalinas Através de Processamento Digital de Texturas Ópticas**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. 130 p.
- ELY, F.; OTSUKA, M. H. M.; MAMMAMA, A. P. Cristais Líquidos Colestéricos: a quiralidade revela as suas cores. **Química Nova**, v. 30, n. 7, p. 1776-1779, Outubro 2007.

FIESCHI, R. **Stati e Trasformazioni della materia**. Primeira edição. Roma: La Nuova Italia Scientifica, 1993. 205 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**, vol. 4. Nona edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 400 p.

KOHN, W. An essay on condensed matter physics in the twentieth century. **Reviews of Modern Physics**, v. 71, n. 2, p. S59-S77, 1999.

KROIN, T. Cristais Líquidos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 02, n. 1, p. 25-30, Abril 1985.

LABURÚ, C. E.; SIMÕES, A. M.; URBANO, A. A. Mexendo com Polaróides e Mostradores de Cristais Líquidos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 15, n. 2, p. 195-205, Agosto 1998.

LENNARD-JONES, J. E. On the determination of molecular fields. **Proceedings of Royal Society of London. Series A**, v. 106, n. 738, p. 463-477, 1924.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**, vol 3. Primeira edição. São Paulo: Editora Blucher, 1998. 323 p.

OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física Moderna no Ensino Médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 3, p. 447-454, Abril 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma Revisão Bibliográfica sobre a Área de Pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

PEREIRA, A. P.; OSTERMANN, F. Sobre o Ensino de Física Moderna e Contemporânea: Uma Revisão da Produção Acadêmica Recente. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 14, n. 3, p. 393-420, 2009.

PERFOL, A. P.; JUNIOR, M. F. R. XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2006, Passo Fundo. **A Física Moderna e Contemporânea e o Ensino de Engenharia**: contexto e perspectivas. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006. p. 55-68.

SANTA CATARINA. **Proposta Curricular de Santa Catarina:** Educação Infantil, Ensino Fundamental e Ensino Médio – disciplinas curriculares. Florianópolis, 1998.

SANTA CATARINA. **Proposta Curricular de Santa Catarina:** formação integral na educação básica. Florianópolis, 2014.

SILVA, J. R. N.; ARENGHI, L. E. B.; LINO, A. Porque inserir física moderna e contemporânea no ensino médio? Uma revisão das justificativas dos trabalhos acadêmicos. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, Curitiba, v. 6, n. 1, p.69-83. Abril 2013.

SILVA, M. O. P. **As Relações Didático-Pedagógicas no Ensino de Geometria com o Software Cabri-Géomètre.** Dissertação de mestrado, PUC PR, 2008.

SLUCKIN, T. J.; DUNMUR, D. A.; STEGEMEYER, H. **Crystals That Flow:** Classic Papers from the History of Liquid Crystals. Segunda edição. Londres: Taylor & Francis e-Library, 2005. 1445 p.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na escola de 2º grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, Dezembro 1992.

TERRAZZAN, E. A. IV EPEF - ENCONTRO DE PESQUISADORES EM ENSINO DE FÍSICA, 1994, Florianópolis. **Perspectivas para a física moderna e contemporânea na escola de segundo grau.** Florianópolis: Atas, 1994. p. 38-45.

TIPLER, P.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**, vol 2. Sexta edição. LTC, 2009. 754 p.

ZABALA, A. **A Prática Educativa:** como ensinar. Tradução por ROSA, E. F. F. Porto Alegre: ArtMed, 1998. 224 p.